

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

КАБАНОВ ЕВГЕНИЙ ИГОРЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛА
УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНА И ПЫЛИ**

Специальность 05.26.01 – Охрана труда (в горной промышленности)

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Г.И. Коршунов

Санкт-Петербург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ.....	10
1.1 Современное состояние и перспективы развития угледобывающей отрасли России	10
1.2 Оценка условий труда на угольных шахтах России.....	17
1.3 Концепция риск-ориентированного подхода при обеспечении безопасности угольных шахт	25
1.4 Анализ методов оценки профессиональных рисков	31
1.5 Выводы по первой главе.....	36
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНА И ПЫЛИ	38
2.1 Анализ причин и последствий взрывов метана и пыли	38
2.2 Регрессионный анализ факторов профессионального риска.....	48
2.3 Анализ факторов, влияющих на метановыделение в горные выработки	58
2.4 Вероятностная оценка травмирования персонала при взрывах метана и пыли.....	70
2.5 Выводы по второй главе.....	78
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНА И ПЫЛИ	80
3.1 Логико-графический анализ профессионального риска	80
3.2 Обоснование модели нечеткого логического вывода	88
3.3 Экспертная оценка факторов	96
3.4 Анализ результатов нечеткого моделирования	101
3.5 Выводы по третьей главе.....	107
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОЦЕНКЕ И ПРОГНОЗУ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНА И ПЫЛИ	109

4.1 Метод комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли	109
4.2 Разработка и апробация программного комплекса расчета показателей профессионального риска.....	115
4.3 Рекомендации по повышению безопасности труда на основе организации системы менеджмента профессиональных рисков.....	123
4.4 Выводы по четвертой главе.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132
Список сокращений и условных обозначений.....	134
Список литературы	136
Приложение А	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Добыча угля на шахтах России происходит в условиях повышения нагрузок на очистные забои и перехода горных работ на более глубокие горизонты. Это приводит к увеличению газообильности подземных выработок и росту потенциальной опасности травмирования персонала при взрывах метана и пыли. Для своевременного принятия мер по предотвращению несчастных случаев и обеспечения безопасности ведения работ на угольных шахтах, в настоящее время осуществляется развитие риск-ориентированного подхода, в основе которого используется принцип оценки и прогноза профессиональных рисков. В частности, действующие требования к системе управления промышленной безопасностью и охраной труда регламентируют выполнение оценки профессиональных рисков на угольных шахтах.

Для решения задачи оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли необходимо использование метода, позволяющего производить определение показателей риска с учетом комплекса горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов. В работах Н.М. Качурина, В.С. Забурдяева, В.Б. Артемьева, Г.И. Коршунова, А.Н. Домрачева, Г.В. Стась, А.Г. Бабенко, А.И. Костогрызова, А.И. Гражданкина, С.В. Баловцева, F.T. Kissel, L.A. Pejic, R.L. Grayson, L. Shi, R. Mevsim, I.L. Cioca, N. Qifeng, H. Wang, A.S. Markowski и других рассмотрено влияние отдельных факторов на риск взрывов метана и пыли. В тоже время вопрос методического обеспечения оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли в условиях информационной неопределенности исходных данных с учетом взаимодействия комплекса факторов остается нерешенным, что подтверждает актуальность темы исследования.

Цель работы. Повышение безопасности труда персонала угольных шахт на основе оценки и прогноза профессионального риска травмирования при взрывах

метана и пыли.

Идея работы. Определение уровня профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли на угольных шахтах в условиях информационной неопределенности должно осуществляться с использованием модели экспертной системы на основе нечеткой логики, позволяющей выполнять прогнозирование опасных ситуаций и опасных зон с учетом влияния комплекса факторов.

Основные задачи исследований:

1. Анализ нормативно-методической базы в области оценки и прогноза профессиональных рисков на опасных производственных объектах угольной промышленности.

2. Исследование профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли. Статистический анализ влияния факторов, характеризующих условия эксплуатации угольных шахт, на показатели индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли.

3. Разработка модели экспертной системы на основе нечеткой логики для расчета численных показателей профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли.

4. Обоснование и разработка метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли. Разработка рекомендаций по организации системы менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах.

Научная новизна:

1. Установлены зависимости индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метанопылевоздушных смесей от газовентиляционных параметров выемочных участков с учетом эффективности мероприятий газового и пылевого режима при среднемесячной производительности труда более 210 т/чел.

2. На основе модели экспертной системы нечеткого вывода установлены связи между численным показателем профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли и показателями горно-геологических,

горнотехнических, субъективных и организационных факторов с учетом их взаимодействия.

Основные защищаемые положения:

1. Ранжирование угольных шахт по прогнозируемому уровню индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана следует производить на основе результатов количественной оценки с использованием многофакторной регрессионной модели, учитывающей связи между частотой поражения персонала при взрывах и относительной газообильностью шахты, склонностью обрабатываемых пластов к самовозгоранию и системой разработки.

2. Численный показатель профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли в подземных выработках угольной шахты в условиях информационной неопределенности следует оценивать с использованием модели экспертной системы на основе нечеткой логики, учитывающей влияние комплекса горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов.

3. Выбор и обоснование превентивных организационно-технических мероприятий по снижению уровня производственного травматизма должны осуществляться с использованием адресного подхода, учитывающего результаты комплексной оценки профессионального риска и прогноза опасных ситуаций и опасных зон, обусловленных воздействием на работающих поражающих факторов взрывов метана и пыли.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использован комплексный метод, включающий: аналитическое исследование теории и практики оценки профессиональных рисков на угольных шахтах; системный анализ профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли; использование компьютерных программ статистической обработки данных; логико-графический анализ и структуризацию факторов риска и факторов защиты; компьютерное моделирование с использованием методов теории нечетких множеств; структурированное объектно-ориентированное программирование в среде Delphi XE.

Достоверность результатов исследований подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов аналитических расчетов и статистических наблюдений; обоснованным использованием методов математической статистики и специализированных компьютерных программ для математической обработки данных; апробацией на действующих угольных шахтах рекомендаций, вошедших в Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах» (утв. Приказом Ростехнадзора № 192 от 05.06.2017)

Практическая значимость работы:

1. Сформирована экспертная система нечеткого вывода для поддержки принятия решений в условиях информационной неопределенности по выбору организационно-технических мероприятий, направленных на снижение уровня производственного травматизма при взрывах метана и пыли.

2. Разработан программный комплекс расчета показателей профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли, позволяющий производить анализ сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий.

3. Обоснован и разработан метод комплексной оценки профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, позволяющий производить прогнозирование опасных ситуаций и опасных зон в подземных выработках угольных шахт.

4. Разработаны рекомендации по оценке рисков, вошедшие в Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценке риска аварий на угольных шахтах» (утв. Приказом Ростехнадзора № 192 от 05.06.2017).

Реализация результатов работы. Разработанные методические рекомендации вошли в заключительный отчет о научно-исследовательской работе «Разработка научно обоснованных предложений по оценке рисков аварий на угольных шахтах с учетом конкретных горно-геологических условий» (договор с Минэнерго России 16/0411.3070390019.241/11/218) и Руководство по

безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах» (утв. Приказом Ростехнадзора № 192 от 05.06.2017), защищены патентом на изобретение «Способ оценки риска взрывов метана и пыли в шахтах».

Личный вклад автора. Сформулированы цель, идея и задачи исследований; выполнен анализ нормативно-методической базы в области оценки профессиональных рисков на опасных производственных объектах угольной промышленности; собраны и обработаны материалы технических расследований причин аварий, произошедших на угольных шахтах в 2005-2016 гг.; проведен анализ профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли и на его основе разработан метод комплексной оценки и прогноза численных показателей риска; разработан специализированный программный комплекс расчета показателей профессионального риска; разработаны практические рекомендации по оценке профессиональных рисков и организации системы менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах; сформулированы основные защищаемые положения и выводы.

Апробация работы. Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на совещании подсекции «Угольная промышленность» секции №5 Научно-технического совета Ростехнадзора (Ростехнадзор, Москва, 2018 г.), Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), VIII конференции Международной горноспасательной организации «IMRB Russia 2017» (г. Новокузнецк, 2017 г.), VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), III Международной научно-

практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, 2016 г.), научных семинарах кафедры безопасности производств Санкт-Петербургского горного университета (2016-2018 гг.).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 7 печатных работах, из них 2 – в изданиях перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки России, 1 – в издании, индексируемом в базе цитирования Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 159 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 27 таблиц, 1 приложение, список литературы из 149 наименований.

ГЛАВА 1 РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

1.1 Современное состояние и перспективы развития угледобывающей отрасли России

Угледобывающая отрасль занимает устойчивую позицию в топливно-энергетическом комплексе России и является одной из системообразующих в отечественной экономике. [31] По своему ресурсному потенциалу (Таблица 1.1) угольная отрасль может рассматриваться как основной источник энергоресурсов при формировании долгосрочной энергетической политики страны.

Уголь добывается в шести федеральных округах и потребляется во всех субъектах. На территории России расположено 22 угольных бассейна и 129 отдельных месторождений, добычу на которых осуществляют 66 угольных шахт и 115 разрезов [106]. Запасы угля установлены в отложениях от девона до плиоцена. Известны угли всех геологических типов и стадий метаморфизма – от чисто гумусовых до богхедов и от различных липтобиолитов и мягких бурых углей до антрацитов. Основными угледобывающими центрами являются: Кузнецкий, Канско-Ачинский, Печорский, Донецкий бассейны, месторождения Восточной Сибири и Дальнего Востока. Качество и марочный состав добываемых углей представлены в Таблице 1.2. Каждый бассейн характеризуется различными горно-геологическими условиями эксплуатации, которые влияют на выбор способов и систем разработки месторождений.

Основной объем угледобычи приходится на Кузнецкий угольный бассейн – здесь производится 58 % всего добываемого угля в стране и 73 % углей ценных коксующихся марок. Кузнецкий бассейн является наиболее перспективной угольной базой страны: балансовые запасы угля Кузбасса оцениваются в 68,3 млрд т, при этом запасы коксующихся углей по сумме категорий А+В+С1 составляют 28,5 млрд т или 73 % от всех запасов России (в том числе запасы наиболее ценных марок ГЖ, Ж, КЖ, К, ОС – 23,4 % (12,3 млрд т). В Кузнецком бассейне установлены угли от бурых до антрацитов, основным объектом

промышленной разработки являются каменные угли. Общая площадь угленосных отложений составляет 27 тыс. км². Добыча угля ведется как открытым, так и подземным способом [90].

Таблица 1.1 – Распределение угольных ресурсов и запасов по видам углей и регионам, млрд т [15]

Регионы	Всего	Бурые угли		Каменные угли				Антрациты	
		Всего	Балансовые запасы	Энергетические		Коксующиеся		Всего	Балансовые запасы
				Всего	Балансовые запасы	Всего	Балансовые запасы		
Европейская часть	101,5	17,1	4,3	57,9	7,1	20,1	3,9	16,4	7,1
Урал	4,9	2,6	1,7	1,9	0,2	0,4	0,4	-	-
Западная Сибирь	718,5	184,7	47,8	312,4	37,8	205,6	38,2	15,8	1,6
Восточная Сибирь	2616,1	370,0	71,4	2116,7	19,5	129,4	3,6	-	-
Дальний Восток	1878,1	1041,4	15,2	740,9	6,6	95,7	5,2	0,05	0,05
Россия	5319,2	1615,8	140,4	3229,8	71,2	441,2	51,5	32,3	8,8

Таблица 1.2 – Характеристика основных угольных бассейнов России [15]

Наименование угольного бассейна	Марки угля	Технический анализ					Добыча в 2015 г., млн т
		W_y , %	A_y , %	S_y , %	V_{daf} , %	Q_y , ккал/кг	
Кузнецкий бассейн	Д, Г, ГЖ Ж, К, КЖ ОС, СС, А	6,0-21,0	13,0-37,5	0,3-0,9	14,5-40,5	4590-6550	215
Канско-Ачинский бассейн	1Б, 2Б, 3Б	24,0-44,0	7,0-12,0	0,2-0,9	44-48	2820-4550	38
Печорский бассейн	Б, Д, ДГ, Ж, ГЖО, К	5,5-11,5	12,0-31,0	0,6-3,2	28,2-40,0	4190-6560	14,6
Восточный Донбасс	Д, Г, Ж, О, К, ОС, Т, А	5,0-20,0	10,0-40,0	1,8-4,0	5,0-44,0	3700-6200	5,2

Где: W_y – содержание влаги в рабочей массе угля, %; A_y – зольность сухой массы угля, %; S_y – содержание общей серы в сухой массе угля, %; V_{daf} – выход летучих веществ на горючую массу угля, %; Q_y – низшая удельная теплота сгорания рабочей массы угля, ккал/кг. Марки ископаемых углей: Бурые угли: Б – Б1, Б2, Б3; Каменные угли: Д – длиннопламенный; Г – газовый; ГЖ – газовый жирный; Ж – жирный; КЖ – коксовый жирный; К – коксовый; ОС – отощенный спекающийся; Т – тощий; СС – слабоспекающийся; Антрациты: А – антрацит; ПА – полуантрацит.

Угленосная толща Кузнецкого бассейна содержит около 260 угольных пластов. Преобладающая мощность пластов находится в пределах от 1,3 до 6,0 м, углы падения – от 0° до 90°. Средняя мощность разрабатываемых угольных пластов 2,1 м. Максимальная глубина разработки не превышает 600 м при

среднем значении около 250 м. Горно-геологические условия подземной разработки характеризуются высокой газообильностью и значительной степенью нарушенности угольных пластов, удароопасностью, склонностью углей к самовозгоранию и наличием труднообрушаемых пород в кровле большинства пластов. В связи с этим, около 64 % шахт работают в условиях природной газоносности свыше $10 \text{ м}^3/\text{т}$, 82 % в условиях опасности по горным ударам и 79 % в условиях опасности по самовозгоранию угля [90]. Угли Кузбасса характеризуются невысокой зольностью и высокой калорийностью. Высокое качество кузнецких углей предопределяет широкую сферу их применения – производство металлургического кокса, строительных материалов, использование в качестве технологического сырья и энергетического топлива. Значительный объем поставок кузбасского угля отправляется на экспорт.

Канско-Ачинский угольный бассейн обладает значительными запасами энергетического бурого угля технологических групп 2БВ и 3БВ. Площадь развития угленосных отложений около 60 тыс. км² при балансовых запасах в 72 млрд т. Высокая мощность угольных пластов (200-400 м) и незначительная глубина их залегания предопределяет благоприятные горно-геологические условия для осуществления добычи открытым способом. Характерной особенностью углей Канско-Ачинского бассейна является высокая доля влаги, что способствует быстрому окислению и увеличению опасности самовозгорания. Добываемые угли имеют ограничения по времени хранения и транспортировки, и используются для выработки электроэнергии в Красноярской, Хакаской и Иркутской энергосистемах. В перспективе прогнозируется увеличение добычи на территории бассейна и дальнейшее использование углей для обеспечения развития энергоемкой промышленности Сибири, а также в качестве сырья для производства синтетического топлива.

Печорский бассейн является самым крупным угольным бассейном Европы и единственным бассейном в европейской части России, содержащим запасы коксующихся углей. В угленосных формациях Печорского бассейна находятся до 250 угольных пластов и пропластков. В продуктивной толще вскрыто 60 пластов

и прослоев, из которых 20 имеют рабочую мощность 0,6-4,5 м при средней мощности 2,5 м. К настоящему времени в Печорском бассейне оценены значительные ресурсы углей всех марок от бурых до антрацитов с преобладанием углей марок Б и Д (до 60 %). Коксующиеся угли представлены марками Ж и ГЖО, а энергетические – марками Д и ДГ. Балансовые запасы установлены на уровне в 210 млрд т при общей площади бассейна в 90 тыс. км². Добыча угля ведется преимущественно подземным способом, глубина горных работ достигает 1200 м. Подземная разработка характеризуется сложными горно-геологическими условиями: большинство шахт относится к сверхкатегорийным по газу и разрабатывает пласты, опасные по горным ударам и внезапным выбросам угля и газа. Залегание пластов угля пологое и наклонное, угол падения колеблется от 2° до 90°. Природная метаноносность угольных пластов доходит до уровня 33 м³/т. Печорский бассейн является поставщиком высококачественных коксующихся углей, основными потребителями которых являются металлургические комбинаты и коксохимические заводы Северо-Запада, Центральной части России и Урала. Добываемые энергетические угли в основном используются на тепловых электростанциях и для коммунально-бытовых нужд. До 2030 года планируется наращивание добычи энергетических и коксующихся углей, а также увеличение объемов экспортных поставок [15].

Восточный Донбасс является частью Донецкого каменноугольного бассейна и основной угольно-сырьевой базой Северо-Кавказского региона. В Восточном Донбассе распространены угли технологических марок от Д до антрацитов. Балансовые запасы оцениваются на уровне в 9,6 млрд т, из которых 32 % – энергетические каменные угли, 65 % – антрациты и 3% – коксующиеся угли. На Восточный Донбасс приходится 95 % добычи всех антрацитов России. Добыча ведется подземным способом. Минимальная мощность пластов, принятая при подсчете балансовых запасов, составляет 0,5-0,6 м, предельная зольность угля – до 40 %. Добываемые в Восточном Донбассе угли используются в качестве топлива на электростанциях, потребляются предприятиями агропромышленного комплекса и в коммунально-бытовом секторе, около 25 % объема углей

отправляется на экспорт. [15] Коксующиеся угли используются на Коммунарском коксохимическом заводе, а так же на ряде металлургических производств. В соответствии с прогнозом, к 2030 г. добыча угля на шахтах Восточного Донбасса может быть доведена до уровня 12 млн т/год за счет наращивания добычи коксующихся углей при освоении новых участков и строительстве новых шахт.

При сохранении общей тенденции к росту, суммарный объем добычи угля в России в 2016 г. составил 385 млн т, из которых 281 млн т добыто открытым способом и 104 млн т – подземным (Рисунок 1.1). Преобладающим способом подземной разработки угольных пластов является столбовая система разработки с использованием комплексно-механизированных очистных забоев (КМЗ).



Рисунок 1.1 – Объем добычи угля в России по способам (с прогнозом на 2020 и 2030 гг.) [81, 107]

Как показано на Рисунке 1.2, в последнее время происходит увеличение удельного веса добычи угля из КМЗ и нагрузки на очистной забой, что сопровождается повышением производительности труда рабочего до уровня 210 т/мес. и более, а так же снижением среднесписочной численности персонала, занятого при подземной добыче угля (Рисунок 1.3).

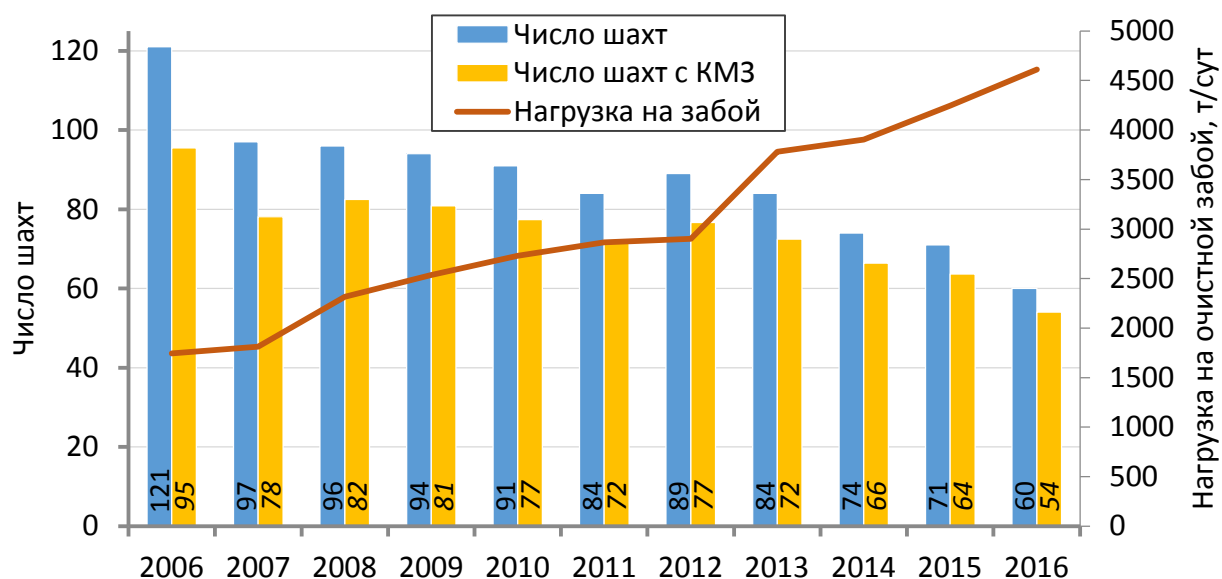


Рисунок 1.2 – Среднесуточная производительность шахт и их количество в 2006-2016 гг. [107]

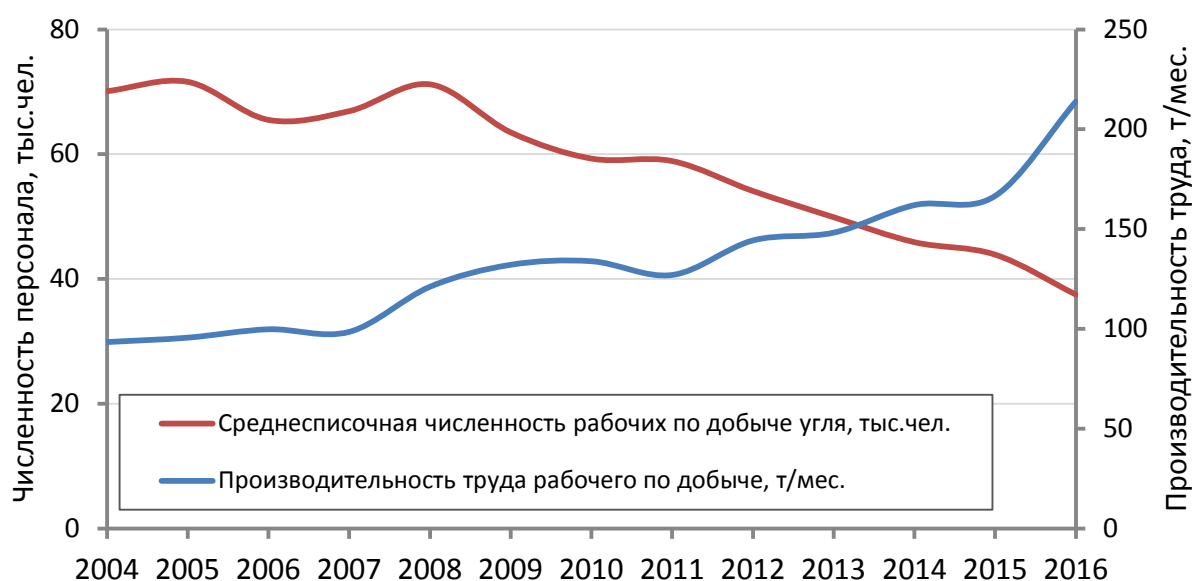


Рисунок 1.3 – Среднесписочное число рабочих по подземной добыче угля и производительность труда в 2004-2016 гг. [33]

Основными потребителями угля на внутреннем рынке являются энергетическая отрасль, коксохимическое производство и население (Рисунок 1.4). Не смотря на существующие проблемы с транспортировкой добываемых углей до морских угольных терминалов, наблюдается положительная динамика

доли экспортных поставок в структуре сбыта. Так в 2016 г. из всего поставленного объема 166 млн т пришлось на внутрироссийские поставки и 164 млн т на экспортные поставки.

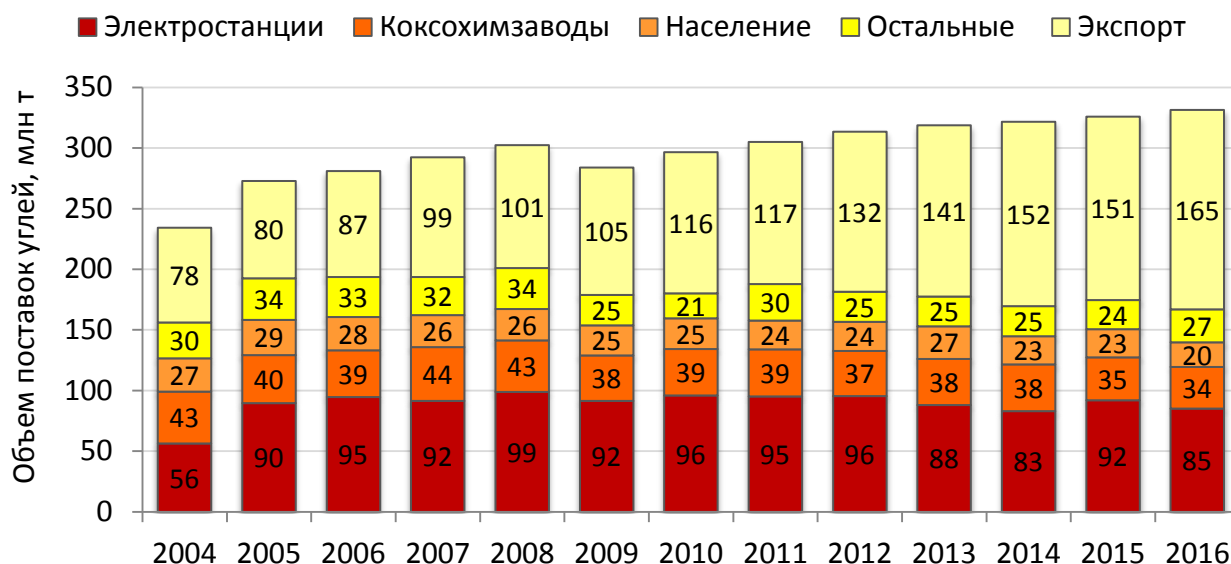


Рисунок 1.4 – Динамика поставок российских углей основным потребителям в 2004-2016 гг. [107]

В настоящий момент на мировом рынке угля наблюдается перераспределение экспортных поставок, связанное с уменьшением объемов потребления угля в развитых странах и его увеличением в развивающихся странах Азиатско-тихоокеанского региона. При этом наблюдается восстановление цен на уголь на международных рынках после падения с пиковых значений в 2011-2015 гг., происходящего на фоне обвального падения мировых цен на нефть и газ. В долгосрочной перспективе прогнозируется увеличение потребления угля в странах Азиатско-тихоокеанского региона, в связи с чем, Стратегией [81] предусмотрено наращивание объемов экспортных поставок угля до 170 млн т/год (из которых 125 млн т/год энергетические и 45 млн т/год коксующиеся угли).

До 2030 г. в структуре внутреннего потребления топливно-энергетических ресурсов прогнозируется снижение доли газа и увеличение доли угля с 11 до 20 %, а при производстве электроэнергии с 34 до 44 %. В рамках реализации

Стратегии [81] планируется развитие производства жидких и газообразных продуктов глубокой переработки угля. Ожидается, что после 2025 г. около 10-15 млн т/год угля будут использоваться для глубокой переработки с получением жидких углеводородов и других синтетических продуктов.

Таким образом, прогнозный объем добычи угля в России к 2030 г. составит 430-470 млн т, из которых 56 % будет использовано на внутреннем рынке. Нарращивание объемов добычи угля предусматривается за счет освоения наиболее рентабельных угольных месторождений, модернизации действующих производств и строительства высокоэффективных шахт и разрезов. Ожидается рост добычи угля коксующихся марок по различным оценкам до уровня 77-153 млн т/год. При условии, что 87 % запасов коксующихся углей в России доступны только для шахтного способа добычи, полное замещение подземного способа разработки открытым является маловероятным. При этом истощение запасов на месторождениях с благоприятными горно-геологическими условиями отработки, увеличение глубины ведения горных работ и повышение производительности добычных забоев приводит к росту потенциальной опасности возникновения аварий и несчастных случаев [108]. В подобных условиях задачи обеспечения безопасности труда на угольных шахтах имеют первостепенное значение для развития угольной промышленности и топливно-энергетического комплекса России.

1.2 Оценка условий труда на угольных шахтах России

Подземной добыче угля сопутствует ряд опасных производственных факторов, связанных в первую очередь со сложными горно-геологическими условиями, использованием высокопроизводительного оборудования и высокой интенсивностью добычных и проходческих работ. Кроме того, на состояние промышленной безопасности и безопасности труда оказывает влияние уровень инженерно-технических решений, технологической дисциплины и профессиональной подготовки производителей работ [113].

По данным Комиссии по выявлению шахт, осуществляющих добычу угля в особо опасных горно-геологических условиях, в 2016 г. в России работы по добыче угля производились на 58 шахтах. Из них 53 шахты являлись опасными по метану: 13 шахт – I категории, 4 – II категории, 6 – III категории, 19 – сверхкатегорийные и 11 – опасные по внезапным выбросам. На 54 шахтах велись работы на пластах, опасных по взрывчатости угольной пыли; на 32 шахтах разрабатывались пласты угля, опасные по самовозгоранию; 25 шахт эксплуатировались в условиях опасности по прорывам воды и пульпы [108]. Воздействие указанных и иных опасностей в условиях действующей шахты зачастую приводит к возникновению аварий и несчастных случаев. Анализ динамики уровней аварийности и смертельного травматизма свидетельствует о наличии тенденции к снижению: показатель общей аварийности на угольных шахтах снизился с 22 аварий в 2004 г. до 7 аварий в 2016 г., а смертельный травматизм в указанный период сократился со 116 до 54 случаев [33].

Значительное влияние на показатели аварийности и травматизма в рассматриваемый период оказала государственная программа реструктуризации угледобывающей отрасли, направленная на обеспечение финансово-экономической устойчивости предприятий в условиях рыночной экономики. Помимо акционирования и приватизации предприятий, реструктуризация сопровождалась закрытием наиболее опасных, убыточных и неперспективных угольных шахт [45]. В связи с проведением коренного реформирования угольной отрасли в конце XX века, наибольший интерес для анализа показателей аварийности и травматизма представляет период последствий активной фазы реструктуризации. Так, в течение периода 2004-2016 гг. были закрыты 56 угольных шахт, эксплуатируемых в опасных условиях, что положительно сказалось на показателях аварийности и производственного травматизма (Рисунок 1.5). На стабилизацию показателя смертельного травматизма также повлиял ряд решений, направленных на модернизацию системы обеспечения безопасности, совершенствование системы норм и правил в области промышленной безопасности и охраны труда, ужесточение контроля за их соблюдением.

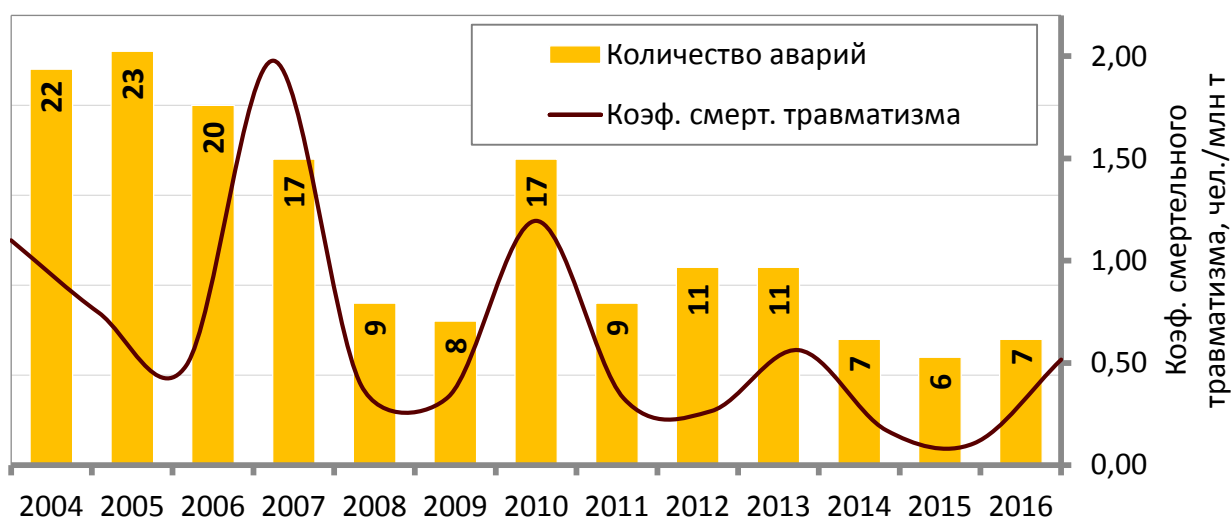


Рисунок 1.5 – Уровень смертельного травматизма при подземной добыче угля в 2004-2016 гг. [33]

С другой стороны, с начала 2000-х годов наблюдается увеличение удельного веса показателей опасности крупных промышленных аварий в общей структуре (Таблица 1.3) [28]. Периодическое возникновение крупных аварий с многочисленными человеческими жертвами свидетельствует о недостаточном уровне безопасности труда и необходимости проведения более глубокого анализа опасных производственных факторов, сопутствующих подземной разработке угольных месторождений.

Таблица 1.3 – Показатели опасности крупных промышленных аварий в период 1980-2010 гг. [28]

№	Показатели аварийности и опасности крупных аварий на угольных шахтах	Периоды рассмотрения, гг.		
		1980-1990	1991-2000	2001-2010
1	Общее количество официально зарегистрированных аварий	1564	857	233
2	Общее количество крупных промышленных аварий (с числом погибших более 10)	5	9	7
3	Общее число погибших в крупных авариях, чел.	115	218	337
4	Среднее число погибших в крупной аварии, чел.	11,5	21,8	33,7

Всего с 2004 по 2016 гг. на шахтах России произошло 167 аварий. Наиболее распространенными из них явились: экзогенные и эндогенные пожары (34 %); взрывы, вспышки, горение газа и пыли (31 %); обрушения горной массы и крепи (14 %); затопления горных выработок, прорывы воды (9 %). Всего в результате аварий и несчастных случаев за указанный период погибли 882 человека.

Основными причинами смертельного травматизма явились: взрывы (вспышки) метана и угольной пыли – 33 %; обвалы и обрушения горной массы (крепи) – 12 %; эксплуатация транспорта – 9 % (Рисунок 1.6). Особо острой является проблема аварий, связанных с взрывами метана и угольной пыли. Такие аварии происходят с наиболее тяжелыми социальными и экономическими последствиями [108].

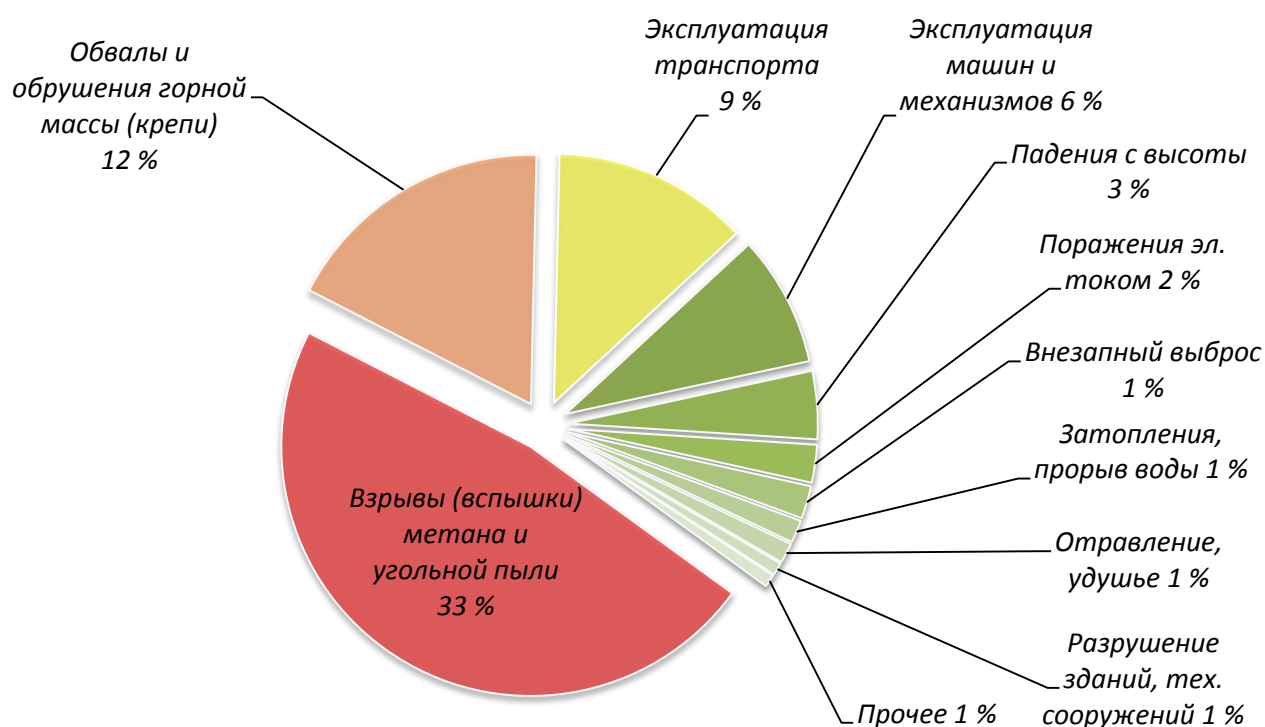


Рисунок 1.6 – Распределение случаев смертельного травмирования персонала угольных шахт при воздействии травмирующих факторов [33]

Оценку уровня опасности различных источников травматизма следует производить на основе показателя индивидуального риска R – ожидаемой частоты гибели человека в результате воздействия исследуемого травмирующего фактора,

год⁻¹ [25]. Использование показателя индивидуального риска обеспечивает переход к количественному показателю опасности, что позволяет сравнивать различные травмирующие факторы между собой и делать выводы о допустимости существующих угроз путем их сопоставления с уровнем допустимого риска – риска, на который общество готово пойти ради выгоды, получаемой от эксплуатации рассматриваемого объекта [56].

Уровень допустимого риска учитывает баланс между техническим и социально-экономическим риском и определяется с учетом экономических и технологических возможностей. В различных странах в качестве допустимых для населения принимаются значения индивидуального риска $R = 10^{-8} \div 10^{-6}$ год⁻¹ [34]. С учетом реального состояния основных производственных фондов промышленных объектов России и результатов анализа частот возникновения крупных производственных аварий, в отечественной практике были предложены следующие уровни допустимости индивидуального риска для персонала [122]:

1. Неприемлемый риск (область недопустимого риска) – $R > 10^{-4}$ год⁻¹: воздействие исследуемого фактора на персонал недопустимо ввиду чрезмерно высокого уровня опасности. Необходимо снижение уровня риска.

2. Контролируемый риск (область допустимого риска) – $R = 10^{-4} \div 10^{-6}$ год⁻¹: воздействие исследуемого фактора считается допустимым и должно находиться под надзором и контролем. Необходимо создание системы, позволяющей в кратчайшие сроки осуществить мероприятия по защите персонала.

3. Пренебрегаемый риск (область допустимого риска) – $R < 10^{-6}$ год⁻¹: воздействие исследуемого фактора может не контролироваться ввиду пренебрежимо низкого уровня опасности для персонала.

Среднее значение допустимого риска в профессиональной сфере деятельности в России установлено на уровне $R = 2,5 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹ [49]. Условия профессиональной деятельности считаются безопасными, если показатель индивидуального риска для персонала ниже допустимого, и опасными – если превышает этот порог.

Для оценки фактических уровней индивидуального риска (Таблица 1.4, 1.5) проанализированы данные о несчастных случаях (НС) и групповых несчастных случаях (ГНС), произошедших на угольных шахтах России в 2004-2016 гг. с определением средневзвешенной по отрасли частоты смертельного травмирования персонала от воздействия различных травмирующих факторов (наблюдаемого индивидуального риска):

$$R_{ik} = \frac{n_{ik}}{N_k}, \quad (1.1)$$

где: R_{ik} – средневзвешенная по отрасли частота смертельного травмирования персонала при воздействии i -го травмирующего фактора в k -ом году (наблюдаемый индивидуальный риск), год⁻¹; n_{ik} – число работников, смертельно травмированных на угольных шахтах от воздействия i -го травмирующего фактора в k -ом году, человек/год; N_k – среднесписочная численность персонала по подземной добыче угля в k -ом году, человек.

Данный подход позволяет проводить оценку опасности различных травмирующих факторов с учетом изменения численности персонала при сокращении числа функционирующих шахт. На основе полученных данных были вычислены усредненные за период 2004-2016 гг. частоты смертельного травмирования персонала от воздействия различных травмирующих факторов, представленные в Таблице 1.6. Анализ полученных данных свидетельствует о преобладающем значении четырех травмирующих факторов: взрывы (вспышки) метана и угольной пыли, обвалы и обрушения горной массы (крепи), эксплуатация транспорта, эксплуатация машин и механизмов.

Таблица 1.4 – Наблюдаемый индивидуальный риск смертельного травмирования при ГНС в 2004-2016 гг., год⁻¹

Год	Травмирующий фактор								
	Взрывы (вспышки) метана и угольной пыли	Пожар (эндогенный, экзогенный)	Выброс угля, породы, газа	Обвалы и обрушения горной массы (крепь)	Транспорт	Горные удары	Затопления, прорыв воды	Отравления, удушье	Прочее
2004	$9,6 \cdot 10^{-4}$	0	0	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0	0	$4,3 \cdot 10^{-5}$
2005	$4,6 \cdot 10^{-4}$	0	0	$2,8 \cdot 10^{-5}$	0	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0	0	$1,4 \cdot 10^{-5}$
2006	$4,6 \cdot 10^{-5}$	0	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0	0	$1,5 \cdot 10^{-5}$
2007	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0	0	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0	0	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
2008	0	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0
2009	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0	0	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0
2010	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0	0	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0
2011	0	0	0	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0	0	$6,8 \cdot 10^{-5}$	0	0
2012	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0	0	$5,5 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	$1,3 \cdot 10^{-5}$
2013	$5,4 \cdot 10^{-5}$	0	0	$4,0 \cdot 10^{-5}$	0	0	$8,0 \cdot 10^{-5}$	0	0
2014	$4,4 \cdot 10^{-5}$	0	0	$4,4 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0
2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	$9,6 \cdot 10^{-4}$	0	0	$5,3 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0

Таблица 1.5 – Наблюдаемый индивидуальный риск смертельного травмирования при НС в 2004-2016 гг., год⁻¹

Год	Травмирующий фактор						
	Обвалы и обрушения горной массы (крепь)	Транспорт	Эксплуатация машин и механизмов	Затопления, прорыв воды	Отравления, удушье	Падения с высоты	Прочее
2004	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0	0	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$
2005	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0	0	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
2006	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0	0	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
2007	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
2008	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
2009	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	0	0	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$

Продолжение таблицы 1.5

Год	Травмирующий фактор						
	Обвалы и обрушения горной массы (крепи)	Транспорт	Эксплуатация машин и механизмов	Затопления, прорыв воды	Отравления, удушье	Падения с высоты	Прочее
2010	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-5}$	0	0	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
2011	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0	0	$3,4 \cdot 10^{-5}$	0
2012	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	0	0	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
2013	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0	0	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
2014	$8,7 \cdot 10^{-5}$	0	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	0	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$
2015	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0
2016	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	$2,7 \cdot 10^{-5}$

Таблица 1.6 – Средние значения наблюдаемого индивидуального риска смертельного травмирования от воздействия травмирующих факторов, год⁻¹

Травмирующий фактор	Средняя частота смертельного травматизма ГНС	Средняя частота смертельного травматизма НС	Средняя частота смертельного травматизма (общая)
Взрывы (вспышки) метана и угольной пыли	$5,1 \cdot 10^{-4}$	0	$5,1 \cdot 10^{-4}$
Обвалы и обрушения горной массы (крепи)	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Транспорт	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Эксплуатация машин и механизмов	0	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Падения с высоты	0	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Затопления, прорыв воды	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Отравления, удушье	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$
Выброс угля, породы, газа	$5,6 \cdot 10^{-6}$	0	$5,6 \cdot 10^{-6}$
Горные удары	$4,2 \cdot 10^{-6}$	0	$4,2 \cdot 10^{-6}$
Пожар (эндогенный, экзогенный)	$1,2 \cdot 10^{-6}$	0	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Прочее	$8,8 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$

Максимальное значение среднего по отрасли наблюдаемого индивидуального риска смертельного травмирования связано с воздействием на персонал опасных факторов взрывов (вспышек) метана и угольной пыли и превышает более чем в 2 раза допустимый уровень $2,5 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹. На отдельных предприятиях наблюдаемый индивидуальный риск смертельного травмирования при взрывах метана и пыли достигал значений: $9,1 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹ (шахта Ульяновская, 2007), $2,8 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹ (шахта Северная, 2016), $2,7 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹ (шахта Юбилейная, 2007), $1,7 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹ (шахта Распадская, 2007).

Таким образом, многократное превышение уровня допустимого индивидуального риска, наряду с катастрофическими социальными и экономическими последствиями, свидетельствует о высокой актуальности задач по минимизации профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли. Для их решения необходима реализация принципов риск-ориентированного подхода, заключающихся в проведении системного анализа и прогноза профессионального риска с учетом специфических условий производственной среды угольных шахт и отдельных участков подземных выработок, позволяющих предоставить информационное обеспечение процессов принятия управленческих решений по предотвращению несчастных случаев.

Актуальность указанных задач подтверждена в ходе работы Комиссии по выявлению шахт, осуществляющих добычу угля в особо опасных горно-геологических условиях, созданной по результатам совещания о состоянии и перспективах развития угольной промышленности (г. Новокузнецк, 04 апреля 2016 г.) [75].

1.3 Концепция риск-ориентированного подхода при обеспечении безопасности угольных шахт

Традиционный подход к обеспечению безопасности заключается в регламентации деятельности системой норм и правил, которые в целом позволяют организовать работу на угледобывающем предприятии. Однако

регулярное возникновение аварий и несчастных случаев свидетельствует о необходимости использования качественно новых подходов в вопросах обеспечения промышленной безопасности и безопасности труда на угольных шахтах. Нормы и правила безопасности имеют преимущественно апостериорный характер: они формируются при анализе произошедших инцидентов, учитывают наихудшие условия развития событий, представляют собой требования и рекомендации, направленные на предотвращение аналогичных событий в будущем. Реализация апостериорного анализа не позволяет учитывать опасные условия, которые не были выявлены предшествующим опытом, что особенно важно при обеспечении безопасности угольных шахт, производственная среда которых динамична и формируется под воздействием специфического комплекса факторов.

Указанный недостаток компенсируется использованием принципов априорного анализа, учитывающего все потенциально возможные для данной системы неблагоприятные события и причины их образования. Выполнение априорного анализа заключается в проведении системного исследования опасностей, оценке и прогнозе выявленных рисков в рамках риск-ориентированного подхода (РОП). РОП позволяет выявлять «узкие места» в системе обеспечения промышленной безопасности и безопасности труда, которые упускаются действующими требованиями законодательства ввиду их апостериорного характера, а также учитывать опасности, связанные с возможными отступлениями от норм и правил безопасности. Применение РОП обеспечивает [92, 98]:

- выявление опасностей, реализация которых возможна в рассматриваемой системе;
- анализ сценариев развития событий, приводящих к реализации выявленных опасностей;
- выделение наиболее значимых событий и факторов, способствующих реализации неблагоприятных событий;
- проведение оценки тяжести последствий неблагоприятных событий;

- разработку на основе проведенного анализа решений, направленных на минимизацию выявленных рисков.

РОП показал высокую эффективность в международной практике, в связи с чем направление по применению РОП было признано актуальным в отечественной профессиональной среде. К предпосылкам закрепления РОП в сфере обеспечения безопасности труда и промышленной безопасности и следует отнести следующие события:

1. В 2007 г. в Концепции демографической политики РФ на период до 2025 года [78], деятельность по управлению профессиональными рисками, включающая создание системы выявления, оценки и контроля таких рисков, обозначена в качестве направления для решения задач по сокращению уровня смертности граждан трудоспособного возраста.

2. В 2011 г. РОП был определен Правительством РФ в качестве руководящего принципа при осуществлении Концепции совершенствования государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности [29].

В последнее время происходит закрепление принципов РОП в нормативной базе, регламентирующей деятельность по обеспечению безопасности труда и промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО). Согласно изменениям в п. 3. ст. 11 Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», вступившим в силу в 2013 г., организации, эксплуатирующие ОПО I класса опасности, в том числе угольные шахты, обязаны создавать систему управления промышленной безопасностью (СУПБ), в задачи которой входит: идентификация, анализ и прогнозирование риска аварий и связанных с такими авариями угроз; планирование и реализация мер по снижению риска аварий на ОПО; своевременная корректировка мер по снижению риска аварий на ОПО [74]. Необходимость реализации РОП при организации охраны труда на угольных шахтах отражена в действующих нормативно-правовых актах, содержащих нормы трудового права. В частности, Трудовой кодекс [109] устанавливает обязанность работодателя по обеспечению

создания и функционирования системы управления охраной труда (СУОТ), определяющей управление профессиональными рисками в качестве процедуры достижения целей работодателя в области охраны труда, и устанавливающей следующий порядок реализации мероприятий по управлению профессиональными рисками [22, 83]:

- выявление опасностей;
- оценка уровней профессионального риска;
- снижение уровней профессионального риска.

Вместе с тем, РОП активно внедряется в сферу государственного надзора [73], в задачи которого входит организация систематического наблюдения за соблюдением установленных стандартов, норм и правил на поднадзорных объектах с целью предупреждения, выявления и пресечения нарушений требований охраны труда и промышленной безопасности [74, 109]. При этом стоит учитывать особую роль государственных надзорных органов при интеграции РОП в сферу обеспечения безопасности труда и промышленной безопасности: их компетенции позволяют объединить контроль соблюдения действующих стандартов, норм и правил безопасности (апостериорный подход) с реализацией априорного подхода, выраженного в проведении оценки и прогноза рисков и в выявлении «узких мест» в системе безопасности ОПО.

К числу предпосылок внедрения РОП в надзорной деятельности также следует отнести реализацию государственной политики по сокращению административных барьеров в предпринимательстве, связанных с государственным контролем (надзором). Так, с 2009 года наблюдается устойчивая тенденция к сокращению масштабов контрольно-надзорной деятельности, осуществляемой Ростехнадзором на объектах угольной промышленности (Рисунок 1.7). При этом с 2011 года наблюдается существенное увеличение общей суммы взысканных штрафов, произошедшее в результате ужесточения санкций за нарушения в сфере безопасности ОПО [71]. В сложившихся условиях особенно важно производить концентрацию ограниченных ресурсов органов надзора без ущерба для безопасности. В связи с этим, согласно ст. 8.1 Федерального закона

[72], РОП при организации и осуществлении государственного контроля (надзора) представляет собой метод, при котором выбор интенсивности (формы, продолжительности, периодичности) проведения мероприятий по контролю и профилактике нарушения обязательных требований определяется путем отнесения деятельности производственных объектов к категории риска либо классу опасности, и применяемый в целях:

- оптимального использования трудовых, материальных и финансовых ресурсов, задействованных при осуществлении контроля (надзора);
- снижения издержек юридических лиц, индивидуальных предпринимателей;
- повышения результативности деятельности надзорных органов.



Рисунок 1.7 – Показатели Ростехнадзора по осуществлению надзорной деятельности на предприятиях угольной промышленности в 2006-2015 гг. [33]

В настоящий момент контрольная и разрешительная деятельность Ростехнадзора дифференцирована с учетом степени риска и масштаба возможных последствий аварий. В соответствии со статической моделью РОП, установлена следующая периодичность плановых проверок [74]:

- для ОПО I и II класса опасности – не чаще одного раза в течение года;
- для ОПО III класса опасности – не чаще одного раза в три года;

- для ОПО IV класса опасности – проверки не проводятся.

С 2017 г. Положением [79] закреплено требование применения РОП при осуществлении государственного надзора за соблюдением трудового законодательства. При этом, в зависимости от показателя потенциального риска, установлено 5 категорий, определяющих особенности осуществления мероприятий по надзору за соблюдением требований охраны труда (Таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Периодичность проведения плановых проверок [79]

Категория риска	Показатель потенциального риска	Периодичность проведения плановых проверок
Высокий риск	$P \geq 1,0$	Один раз в 2 года
Значительный риск	$0,75 \leq P \leq 0,99$	Один раз в 3 года
Средний риск	$0,50 \leq P \leq 0,74$	Не чаще, чем один раз в 5 лет
Умеренный риск	$0,25 \leq P \leq 0,49$	Не чаще, чем один раз в 6 лет
Низкий риск	$P \leq 0,24$	Не проводятся

Сложившиеся условия позволяют использовать РОП в дополнении к традиционному подходу, что приведет к созданию на угольных шахтах качественно новой системы обеспечения безопасности труда и промышленной безопасности. В свою очередь, практическая реализация РОП при решении задач снижения профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли заключается в использовании метода, позволяющего проводить оценку и прогноз профессионального риска с учетом специфики анализируемых объектов, обусловленной воздействием комплекса факторов на производственную среду. В соответствии с требованиями [62, 74, 82, 83], для оценки численных показателей профессиональных рисков, сопутствующих подземной добыче угля, следует использовать методы комплексного анализа, позволяющие учитывать совместное воздействие факторов на формируемые условия труда [117]. При этом результаты анализа должны предоставлять возможность осуществления прогноза возникновения опасных ситуаций и опасных зон с учетом различных сценариев и причин реализации неблагоприятных событий.

1.4 Анализ методов оценки профессиональных рисков

Для выбора методического подхода к оценке профессионального риска смертельного травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли проведен анализ методической базы оценки рисков, в результате которого установлены области применения различных методов в зависимости от имеющегося объема данных статистических наблюдений и доступности необходимой для моделирования информации (Рисунок 1.8, Таблица 1.8) [14].



Рисунок 1.8 – Области применения методов анализа риска [14]

Статистические методы анализа риска позволяют выявлять взаимосвязи между отдельными факторами и показателями риска, а также устанавливать функциональные зависимости между ними. Статистические методы позволяют получать наиболее объективные результаты и подразумевают минимальное число допущений [14].

Известны методы оценки риска аварий при подземной добыче угля, основанные на статистическом анализе ретроспективных данных [68, 105, 131, 132, 144]. Так, проведение корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализов позволяет установить влияние отдельных факторов на риск, что может быть использовано для обоснования степени опасности угольных шахт. Однако в существующих условиях информационной неопределенности, обусловленной недостаточностью и неточностью исходных данных, а также различными

подходами к их обработке, использование статистических методов для проведения комплексного анализа профессионального риска затруднительно, поскольку для учета редких событий необходимо привлечение вероятностных или экспертных методов.

Таблица 1.8 – Методический аппарат анализа рисков [14]

Методы	Решаемая задача		
	Идентификация опасностей	Оценка риска	Прогноз риска
Статистические	Проверка статистических гипотез, выявление связей между факторами и опасностями с использованием корреляционного, дисперсионного, факторного анализа	Статистическая оценка, выявление зависимостей между факторами и опасностями с использованием регрессионного анализа, множественной регрессии	Прогнозирование с использованием временных рядов, нейросетевого анализа
Вероятностные	Анализ условий протекания процессов феноменологическим методом, этапов развития событий детерминистическим методом	Вероятностная оценка с использованием элементов теории вероятности, теории графов, имитационного моделирования	Прогнозирование с использованием элементов теории вероятности, теории катастроф, имитационного моделирования
Экспертные	Экспертная оценка причин неблагоприятных событий	Экспертная оценка с использованием матричных моделей, элементов теории нечетких множеств	Прогнозирование с использованием нечетких моделей

Вероятностные методы основаны на использовании математических имитационных моделей, содержащих элементы теории вероятности, теории надежности и математической статистики. Они позволяют моделировать относительно редкие события с учетом взаимосвязи частных показателей, получаемых при анализе источников потенциальных опасностей, а также учитывать факторы, недоступные для статистических методов анализа риска. Так, искомые величины представляют вероятностными характеристиками случайного явления, что позволяет определить их путем моделирования и последующей обработки выходных данных [48]. Примеры реализации вероятностного подхода

к оценке риска взрывов метана и пыли с учетом ограниченного набора факторов приведены в работах [7, 35, 43, 44, 53, 67, 102, 141]. Ограничения в использовании вероятностных методов также связаны с информационной неопределенностью, приводящей к трудностям в определении исходных данных при построении моделей и установлении законов распределения случайных величин. Кроме того, при моделировании событий, возникающих в сложных геотехнических системах, необходимо производить учет многочисленных процессов, стремящихся к возвращению нарушенной геологической среды в состояние природного равновесия [98]. Что наряду с влиянием комплекса организационных и субъективных факторов приводит к высокой сложности формализации задач. В итоге, учет масштабного комплекса факторов в имитационных моделях значительно увеличивает трудозатраты при их разработке и снижает точность получаемых результатов, что делает нецелесообразным их использование в вопросах комплексного анализа профессиональных рисков [149].

Таким образом, не смотря на более высокую степень объективности данных, полный количественный анализ не всегда может быть возможен или желателен из-за недостаточности информации об анализируемой системе, нецелесообразности трудозатрат или низкой точности результатов анализа [60]. Поэтому в существующих условиях информационной неопределенности широкое распространение на практике получили полуколичественные (экспертные) методы анализа, в первую очередь – матричный метод и методы балльной оценки. В частности, известны методы оценки и ранжирования риска аварий на угольных шахтах и профессиональных рисков, связанных с взрывами метана и пыли, основанные на анализе матриц рисков [11, 30, 39, 126, 139, 140]. Однако область использования матричного метода не предусматривает его применение при комплексном анализе риска с высоким уровнем детализации сценариев [27].

К методам балльной оценки рисков относятся различные методы определения индексов опасности (весовых коэффициентов, рангов и пр.), основанные на результатах экспертных оценок [5, 10, 57, 69, 103, 134 и др.]. В настоящее время указанный методический подход получил широкое

распространение среди отечественных угледобывающих предприятий. Кроме того, балльный метод использован в действующем Руководстве по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах» [63], определяющем экспертную оценку факторов риска возникновения аварий на основе индексов опасности аварии (ИОА), рангов и весов. В соответствии с методом, ИОА подвергаются лингвистической классификации по градациям с определением баллов для каждого i -го анализируемого фактора (B_i). При этом веса факторов рассчитываются на основе рангов:

$$W_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (1.2)$$

где: W_i – вес i -го фактора; r_i – ранг i -го фактора; n – количество факторов. Интегральный показатель опасности аварии R'' рассчитывается как средневзвешенный балл по факторам и используется для определения лингвистического уровня риска, отражающего степень его допустимости:

$$R'' = \frac{\sum_{i=1}^n (B_i \cdot W_i)}{n}. \quad (1.3)$$

Представленный метод позволяет производить ранжирование угольных шахт и отдельных участков сети подземных выработок по степени опасности взрывов метана и пыли на основе учета неполного набора факторов. Кроме того, для расчета показателей профессионального риска необходимо производить учет взаимодействия факторов, а также производить оценку поражающего действия взрывов на персонал.

Проведенный анализ показал, что в настоящий момент не решен вопрос методического обеспечения процедуры оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, удовлетворяющего установленным требованиям [62, 74, 82, 83] и принципам РОП. В соответствии с чем, актуальной является задача разработки метода, позволяющего:

- производить расчет и оценку численного показателя профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли с учетом специфики угольных шахт;

- учитывать комплекс горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов профессионального риска в условиях информационной неопределенности исходных данных;

- учитывать совместное воздействие факторов на показатели профессионального риска;

- осуществлять анализ возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий;

- производить прогнозирование опасных ситуаций и опасных зон, обусловленных воздействием поражающих факторов взрывов на горнорабочих;

- обеспечить возможность выполнения оценки и прогноза профессионального риска широким кругом пользователей.

Решение поставленной задачи может быть достигнуто при использовании логико-графических методов анализа с применением элементов теории нечетких множеств и нечеткой логики для выполнения математических операций расчета численных показателей профессионального риска. Логико-графические методы сосредоточены на детальном анализе и оценке возможности реализации различных сценариев, а также отдельных причин и последствий рассматриваемых событий. В зарубежной и отечественной практике широко применяются методы логико-графического анализа риска аварий и профессиональных рисков на угольных шахтах с использованием иерархических структур деревьев отказов (Fault tree analysis – FTA), деревьев событий (Event tree analysis – ETA) и схем «галстук-бабочка» (Bow tie analysis – BTA) [7, 9, 88, 123-125, 127, 130, 135, 137, 146 и др.]

Методы, основанные на элементах теории нечетких множеств и нечеткой логики, являются альтернативой вероятностным и статистическим методам исследования, основные отличия от которых наиболее полно представлены в [87]. Высокая адаптивность методов нечеткой логики позволяет агрегировать

неоднородную информацию (детерминированную, статистическую, интервальную, лингвистическую) и использовать ее при решении задач управления и прогноза параметров сложных систем [87]. Кроме того, использование лингвистических переменных при оценке исходных данных позволяет производить учет неопределенности и приводить разнородные показатели комплекса факторов к общей шкале. В зарубежной практике нечеткие модели широко используются для оценки и прогноза риска аварий и профессиональных рисков, сопутствующих подземной добыче угля [128, 145, 147 и др.]. В частности, в работах [32, 112, 135, 142, 148] обоснована актуальность использования аппарата нечетких множеств и нечеткой логики при анализе рисков, связанных с взрывами метана и пыли в угольных шахтах.

Таким образом, для выполнения установленных требований к оценке и прогнозу профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли в существующих условиях информационной неопределенности, необходима разработка метода, основанного на использовании модели нечеткого логического вывода с иерархической структурой. Для создания модели, в первую очередь, необходимы: проведение системного анализа профессионального риска с целью формирования иерархической структуры, учитывающей комплекс горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов; формализация структурных межфакторных связей, выполненная на основе результатов статистического анализа, математического моделирования и экспертной оценки.

1.5 Выводы по первой главе

1. С учетом прогнозируемого усложнения горно-геологических условий разработки и увеличения интенсивности работ по подземной добыче угля, решение задач обеспечения безопасности труда персонала угольных шахт имеет первостепенное значение для развития угледобывающей отрасли России.

2. Реструктуризация угольной промышленности и совершенствование систем обеспечения безопасности труда и промышленной безопасности угольных

шахт привели к снижению общего уровня смертельного травматизма при подземной добыче угля. Однако наблюдаемый в период 2004-2016 гг. индивидуальный риск гибели персонала при взрывах метана и пыли в разы превышает уровень допустимого риска и является наиболее высоким в отрасли.

3. В соответствии с передовым международным опытом, для решения задач минимизации профессиональных рисков применяется риск-ориентированный подход. В основе реализации риск-ориентированного подхода регламентировано использование методов оценки профессиональных рисков, учитывающих комплекс факторов, и позволяющих осуществлять прогноз возникновения опасных ситуаций и опасных зон с учетом различных сценариев и причин реализации неблагоприятных событий.

4. Анализ существующего методического обеспечения свидетельствует, что для выполнения требований к оценке и прогнозу профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли в существующих условиях информационной неопределенности исходных данных необходима разработка метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска, основанного на использовании модели нечеткого логического вывода.

5. Реализация модели нечеткого логического вывода для расчета численных показателей профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли должна основываться на применении графической иерархической схемы, сформированной в соответствии с результатами системного анализа риска. При этом следует учитывать комплекс горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов, а также результаты формализации структурных межфакторных связей, полученные в ходе статистического анализа, математического моделирования и экспертной оценки.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНА И ПЫЛИ

2.1 Анализ причин и последствий взрывов метана и пыли

При анализе профессионального риска необходимо производить учет статистических данных об аварийности и травматизме, в соответствии с чем рассмотрены акты технического расследования причин аварий, произошедших в результате взрывов, вспышек и воспламенений метана и пыли на угольных шахтах России в 2005-2016 гг. Основной целью данного анализа является установление причин образования опасных ситуаций, типовых сценариев травмирования персонала при взрывах метана и пыли, а так же получение количественных данных о распределении частот аварий и иницирующих событий для последующей оценки факторов риска. Не смотря на схожие условия возникновения, ввиду различной поражающей способности, следует производить разделение видов горения метановоздушных смесей (МВС) согласно следующей классификации:

а) взрыв МВС, взрыв МВС с участием пыли – быстрое горение смеси, при котором происходит выделение тепловой энергии и образование сжатых газов, формирующих зону избыточного давления и воздушную ударную волну, способную производить механическое разрушение и скорость распространения которой превышает скорость распространения пламени (до 700 м/с) [3];

б) вспышка МВС – быстрое горение смеси со скоростью распространения до 37 м/с, при котором происходит выделение тепловой энергии без образования воздушной ударной волны;

в) воспламенение (возгорание) МВС – горение смеси, сопровождающееся появлением пламени и выделением тепловой энергии.

Всего за анализируемый период произошло 50 взрывов, вспышек и воспламенений метана и пыли, 56 % из которых произошли на шахтах Кузнецкого угольного бассейна, 8 % – Печорского угольного бассейна, по 2 % – на шахтах месторождений Сахалинской и Челябинской областей, а так же

Произошедшие взрывы, вспышки и воспламенения метана и пыли зарегистрированы на 32 шахтах из 98, производивших добычу угля в анализируемый период. Наибольшее число аварий произошло на шахтах:

- «Алардинская», «им. Ворошилова» – 4 случая;
- «Распадская», «им. Ленина», «им. Дзержинского» – 3 случая;
- «Юбилейная», «им. Ялевского», «Красногорская», «Коксовая» (г. Прокопьевск), «Киселевская» – 2 случая.

При этом 5 случаев (8 %) произошли во время проведения ремонтных работ, 4 случая (8 %) при проведении аварийно-спасательных работ и по 2 случая (4 %) в процессе демонтажа очистного комплекса и при ликвидации шахты.

Таблица 2.1 – Распределение показателя смертельного травматизма по профессиям

[illegible]

Распределение зарегистрированных случаев взрывов, вспышек и воспламенений метана и пыли, представленное на Рисунке 2.1, показывает, что 66 % случаев произошли на выбросоопасных и сверхкатегорийных по метану шахтах. До 48 % всех проанализированных аварий связаны с образованием слоевых и местных скоплений метана.

Основными местами возникновения взрывов, вспышек и воспламенений метана и пыли явились выработанные пространства, добычные и проходческие забои (Таблица 2.2). Сопоставление полученных данных с исследованиями, приведенными в [52], свидетельствует о сохранении доли взрывов, произошедших в очистных забоях и выработанных пространствах, на уровне 20-26 %: в выработанных пространствах в период 1990-2004 гг. – 26 %, в период 2005-2016 гг. – 20 %; в очистных забоях в период 1990-2004 гг. – 24 %, в период 2005-2016 гг. – 26 %. При этом наблюдается снижение доли взрывов, произошедших в забоях тупиковых горных выработок, с 28 % в период 1990-2004 гг. до 18 % в 2005-2016 гг.

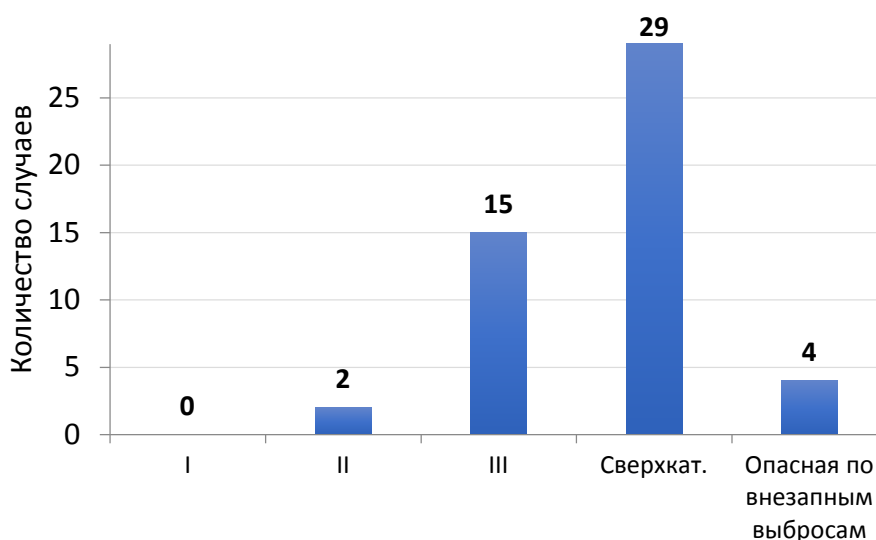


Рисунок 2.1 – Распределение случаев взрывов, вспышек и воспламенений метана и пыли в зависимости от категории шахт по газу

Поражающая способность взрывов, вспышек и воспламенений метана и пыли в условиях подземных горных выработок определяется наличием

соответствующих опасных факторов, обладающих свойствами физического и химического воздействия на организм рабочего [21]. Распределение случаев травматизма в зависимости от причины НС представлено в Таблице 2.2. Согласно полученным данным, максимальная поражающая способность отмечается у взрывов МВС с участием пыли. Так, в результате 5 случаев подобных аварий травмировано 445 человек, в том числе смертельно 284 человека, что составляет 69 % и 77 % от общего числа пострадавших при анализируемых авариях 2005-2016 гг. В результате удельные показатели травматизма K_1 и смертельного травматизма K_2 достигли значений 89,0 чел./случай и 56,8 чел./случай соответственно, что в десятки раз превышает наблюдаемый ущерб от рассмотренных аварий иного типа.

Таблица 2.2 – Распределение показателей травматизма в зависимости от причины НС

Причина НС	Число НС	Пострадало, чел	K_1 , чел./случай	Погибло, чел	K_2 , чел./случай
Взрыв МВС с участием пыли	5	445	89,0	284	56,8
Взрыв МВС	22	135	6,10	72	3,27
Вспышка МВС	11	38	3,45	10	0,91
Воспламенение МВС	12	26	2,17	4	0,33

В Таблице 2.3 показано, что все зарегистрированные взрывы МВС с участием угольной пыли произошли в пределах добычных забоев или конвейерных выработок – местах наиболее интенсивного пылеобразования и пылеотложения вследствие использования высокопроизводительных выемочных машин и конвейерных линий. Кроме того, 60 % зарегистрированных в период 2005-2016 гг. случаев участия угольной пыли во взрывах было инициировано первичными взрывами метана.

Подавляющее число взрывов МВС произошло: в выработанных и изолированных пространствах; в проходческих и добычных забоях. В первом случае образованию взрывоопасных МВС способствовало накопление метана в

непроектируемых и изолированных от общешахтной вентиляционной сети участках за счет его естественного выделения из обнаженной поверхности пласта, зон геологических нарушений, угольных целиков, подрабатываемых и надрабатываемых пластов-спутников. При этом в 50 % случаев отмечено нарушение технологии ведения работ, в 30 % – снижение интенсивности дегазации. В добычных и проходческих забоях 67 % взрывов связано с несоответствием расчетных значений расхода воздуха для вентиляции выработок фактическому газовыделению, по 33 % – с отступлением от принятых проектных решений и образованием местных сопротивлений.

Таблица 2.3 – Распределение случаев возникновения НС по местам

Причина НС	Добычной забой и его сопряжения	Выработанное пространство	Проходческий забой	Изолированная выработка (тупик выработки, сбойка)	Выработка выемочного участка	Скважина	Ствол	Вентиляционный штрек у изолирующей перемычки	Камера приводов конвейера	Дегазационная камера
Взрыв МВС с участием пыли	4	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Взрыв МВС	2	7	4	4	1	1	1	2	-	1
Вспышка МВС	-	2	4	1	2	-	1	-	-	-
Воспламенение МВС	7	1	1	1	-	2	-	-	-	-
Всего	13	10	9	6	3	3	2	2	1	1
Доля, %	26	20	18	12	6	6	4	4	2	2

Среди произошедших в 2005-2016 гг. вспышек МВС 80 % зарегистрированы в проходческих забоях, выработках выемочных участков и выработанных пространствах. Основной причиной их возникновения явилось наличие местных скоплений метана при его выделении из груди забоя, обнаженной поверхности пласта, скоплений отбитого угля и изолированного пространства при вскрытии изолирующих перемычек. В 50 % случаев вспышек МВС в проходческих забоях отмечалось повреждение вентиляционного става или

его отставание от груди забоя. 25 % всех вспышек МВС произошли в результате несоответствия расчетных значений расхода воздуха для вентиляции выработок фактическому газовыделению. К сопутствующим причинам также отнесены: нарушение технологии ведения работ, в том числе взрывных; нарушение дегазации выработанного пространства; нарушение фрикционной защиты и взрывозащиты оборудования.

Подавляющее число случаев воспламенения МВС за анализируемый период произошло в добычных забоях. В 43 % случаев отмечено образование слоевых и местных скоплений метана вследствие возникновения местных сопротивлений и застойных зон, в том числе в 29 % случаев – в результате невыполнения принятых проектных решений.

Возникновение взрывоопасной среды в 50 % проанализированных случаев взрывов, вспышек и воспламенений метана и пыли связано с невыполнением проектных решений и наличием ошибок в проектной документации, 22 % – с нарушением проветривания выработок и забоев, а также 10 % – с неравномерной работой вентиляционных и дегазационных установок. Кроме того, в 90 % случаев отмечен неудовлетворительный уровень контроля проветривания и газовой обстановки, в 14 % – преднамеренное вмешательство в работу систем аэрогазового контроля (АГК). Полный перечень причин образования взрывоопасных смесей, полученный в результате проведенного анализа, представлен в Таблице 2.4. При этом в соответствии с [80] отмечены основные технические, организационные и прочие причины.

При определении факторов риска взрывов метана необходимо устанавливать основные причины образования высокотемпературных источников инициирования, поскольку они также являются необходимым условием для возникновения процессов горения.

Таблица 2.4 – Основные причины образования взрывоопасных смесей, выявленные при анализе аварий 2005-2016 гг.

Причина		Число случаев
Технические причины		
1	Нарушение проветривания выработок и забоев:	11
	- создание дополнительного аэродинамического сопротивления	5
	- отставание вентиляционного става от груди забоя	4
	- создание слабопроветриваемых зон в результате подработки целика	1
	- образование непроветриваемого тупика после возведения перемычки	1
2	Неравномерная работа оборудования:	5
	- остановка вентиляторов газоотсасывающих установок	2
	- отключение вентилятора главного проветривания	2
	- остановка вентилятора местного проветривания	1
3	Поступление метана из выработанного пространства:	6
	- в результате потери герметичности изолирующих перемычек	3
	- при посадке кровли в выработанном пространстве	2
	- при снижении интенсивности дегазации выработанного пространства	1
4	Повреждение вентиляционного става	1
Организационные причины		
5	Отсутствие должного контроля проветривания и газовой обстановки	32
6	Наличие нарушений в проектной документации:	13
	- принятие необходимых мер безопасности в проекте	4
	- неправильный расчет количества воздуха для проветривания	3
	- проектные решения не согласованы в установленном порядке	2
	- проветривание не увязано с неравномерным подвиганием забоя	2
	- нарушение требований при составлении паспорта разработки выемочного участка	1
	- использование недостоверных исходных данных	1
7	Невыполнение проектных решений:	12
	- нарушение технологии ведения горных работ	5
	- невыполнение решений по дегазации	4
	- подработка целиков	3
8	Отсутствие должного контроля за газовой обстановкой в выработанном пространстве	13
9	Нарушение при эксплуатации системы аэрогазового контроля.:	7
	- блокировка аппаратуры контроля содержания метана	3
	- блокировка системы аварийного отключения электроэнергии	2
	- отсутствие системы аварийного отключения электроэнергии	2
10	Нарушение норм и правил при разгазировании горных выработок:	4
11	Невыполнение противопопылевых мероприятий	2
Прочие причины		
12	Взвешивание отложений угольной пыли	3

В соответствии с результатами анализа, представленными в Таблице 2.5, основными источниками инициирования взрывоопасных смесей в шахтах в период с 2005-2016 гг. явились электрические искровые/дуговые разряды, чья доля по сравнению с периодом 1991-2004 гг. сохранилась на уровне 32 % и увеличивается по отношению к уровню 18 %, зарегистрированному в 1961-1990 гг. [67]. Подавляющее большинство случаев возникновения электрических разрядов связано с механическим повреждением питающих электрокабелей – 16 %, а также подачей напряжения на электрооборудование с заведомо нарушенной взрывозащитой – 10 %.

Вторым по значимости источником инициирования являются очаги самовозгорания угля (эндогенные пожары), чья доля продолжает увеличиваться по сравнению с прошедшими периодами: с 3 % в 1961-1990 гг. и 17 % в 1991-2004 гг. до 26 % в 2005-2016 гг. При этом 18 % всех случаев связано с самовозгоранием угля в выработанных пространствах, 2/3 из которых произошли по причине возникновения аэродинамической связи с очагом самовозгорания через изолирующие переемы в результате некачественной изоляции.

Доля образования источников инициирования при фрикционном трении сохраняется по сравнению с периодом 1991-2004 на уровне 12 % и снижается по отношению к уровню 26 %, зарегистрированному в 1961-1990 гг. Среди основных причин фрикционного искрения в 50 % случаев отмечено нарушение фрикционной защиты исполнительных органов добычных и проходческих комбайнов.

Стоит отметить тенденцию к снижению доли взрывных работ среди источников инициирования с уровня 46 % в период 1961-1990 гг. до значений 25 % в 1991-2004 гг. и 14 % в 2005-2016 гг. Все случаи образования источника инициирования при взрывных работах в анализируемый период 2005-2016 гг. произошли по причинам, связанным с грубыми нарушениями правил ведения взрывных работ, в том числе в 6 % случаев – с инициированием зарядов взрывчатого вещества запрещенным способом, в 4 % случаев – с разбучиванием углеспускных печей и скважин взрыванием.

К выявленным источникам инициирования также относятся: в 4 % случаев – попадание молнии в поверхностные дегазационные установки с дальнейшим возгоранием метана и проникновением раскаленных продуктов в отработанное пространство через скважину, а также использование курительных принадлежностей, в 2 % случаев – возгорание угольной пыли при нагревании металлических частей конвейера.

Таблица 2.5 – Основные причины образования источников инициирования взрывоопасных смесей, выявленные при анализе аварий 2005-2016 гг.

№	Причина	Число случаев
Технические причины		
1	Самовозгорание угля и угольной пыли:	13
	- самовозгорание угля в выработанном пространстве	9
	- самовозгорание угля в краевой части пласта/целика	2
	- самовозгорание угольной пыли	2
2	Нарушение взрывобезопасности электрооборудования:	8
	- повреждение электрического кабеля в подземной выработке	5
	- выдергивание электрического кабеля комбайна из коробки ввода	2
	- повреждение электрического кабеля на поверхности при ведении земляных работ	1
3	Образование аэродинамической связи с очагом пожара:	4
	- при наличии действующего пожара	2
	- при активизации списанного ранее пожара	2
4	Невыполнение мер по фрикционной защите исполнительного органа:	3
	- неэффективное взрывозащитное орошение комбайна	2
	- высокий износ зубков исполнительного органа комбайна	1
5	Попадание молнии в поверхностную газоотсасывающую установку	2
6	Нагрев частей приводного вала забойного конвейера до температуры воспламенения угольной пыли	1
Организационные причины		
7	Не соблюдение технологии производства работ:	8
	- взрывных работ	7
	- земляных работ на дневной поверхности	1

Продолжение таблицы 2.5

№	Причина	Число случаев
8	Эксплуатация электрооборудования с нарушенной взрывозащитой	5
9	Нарушение правил ведения взрывных работ:	7
	- подрывание заряда взрывчатого вещества запрещенным способом	3
	- разбучивание скважин и углеспускных печей взрыванием	2
	- несанкционированное изменение конструкции и веса зарядов	2
	- использование взрывчатого вещества несоответствующего класса предохранительности	1
10	Пользование открытым огнем при курении сигареты	2
11	Использование электрооборудования в не предназначенных целях	2
12	Нарушение правил безопасности при использовании электрооборудования на исходящей струе	2
13	Непринятие мер по безопасной отработке лавы в контуре пожара	1
Прочие причины		
14	Некачественная изоляция выработанного пространства с возникновением аэродинамической связи с очагом самовозгорания угля	6
15	Обрушение пород и угля:	4
	- отслоение пород кровли с дальнейшим падением на режущий орган комбайна	2
	- обрушение угля с дальнейшим повреждением электрического кабеля	2
16	Отступление от требований к возведению крепи усиления изолирующей перемычки	1

При проведении анализа причин взрывов, вспышек и воспламенений метана и пыли также отмечены организационные причины [54, 118], представленные в Таблице 2.6. Так, неудовлетворительный уровень контроля за выполнением работ со стороны инженерно-технического персонала и низкий уровень производственной дисциплины, выражающийся в халатном отношении исполнителей работ к требованиям безопасности, отмечены в 64 % и 40 % случаев соответственно.

Всего в ходе анализа установлены 57 коренных причин возникновения взрывов метана и пыли. Результаты анализа свидетельствует, что не смотря на снижение числа взрывов по отношению к периоду 1991-2004 гг., вклад организационных причин в их формирование остается преобладающим и

подавляющее большинство несчастных случаев связано с организационно-техническими действиями или бездействиями людей.

Таблица 2.6 – Общие организационные причины анализированных аварий 2005-2016 гг.

Причина		Число случаев
1	Низкий уровень производственного контроля за соблюдением требований ПБ	32
2	Низкий уровень производственной дисциплины	20
3	Невыполнение положений о нарядной системе	6

Выявленные причины следует учитывать при оценке и прогнозе профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, для чего необходимо проведение анализа факторов профессионального риска, влияющих на возможность возникновения несчастных случаев.

2.2 Регрессионный анализ факторов профессионального риска

При применении принципов РОП практический интерес представляет задача прогноза показателей индивидуального риска при воздействии опасных производственных факторов на персонал с учетом специфических условий эксплуатации угольной шахты. Решение указанной задачи достигается при проведении ретроспективного анализа данных с дальнейшим регрессионным анализом, выполняемым с целью выявления функциональных зависимостей наблюдаемого индивидуального риска от основных горно-геологических и горнотехнических условий разработки месторождения. Выходными данными полученных регрессионных моделей являются прогнозные показатели, выраженные в виде математического ожидания индивидуального риска, которые могут быть использованы в целях количественной оценки, а также ранжирования и выявления угольных шахт, производственная среда которых характеризуется высоким значением профессионального риска

Для проведения анализа индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана были проанализированы акты технического расследования причин аварий, произошедших в результате взрывов, вспышек и воспламенений метана в 2005-2016 гг., а также параметры 98 шахт, эксплуатируемых в указанный период [50]. К числу проанализированных параметров i -ой шахты относятся следующие показатели: k_{ei} – количество произошедших взрывов метана; N_i – среднесписочное число работников, чел.; n_i – число работников, смертельно травмированных при взрывах, чел.; q_{1i} – относительная газообильность шахты, м³/т; q_{2i} – абсолютная газообильность шахты, м³/мин; h_i – глубина разработки, м; m_{di} – объем суточной добычи, т/сутки; s_i – тип системы разработки; a_{1i} – способ проветривания; a_{2i} – схема проветривания; c_i – опасность пласта по самовозгоранию; e_i – опасность пластов по взрывчатости пыли, T_i – время функционирования i -ой шахты в течение анализируемого периода, год. В качестве показателей риска использованы: Q_i – среднегодовая частота взрывов метана на i -ой шахте, год⁻¹; R_i – среднегодовой наблюдаемый индивидуальный риск смертельного травмирования персонала при взрывах метана на i -ой шахте, год⁻¹:

$$Q_i = \frac{k_{ei}}{T_i}, \quad (2.1)$$

$$R_i = \frac{n_i}{N_i \cdot T_i}. \quad (2.2)$$

Для выбора метода анализа статистической значимости влияния факторных признаков (показателей условий эксплуатации шахт) на результативные признаки (показатели риска) проведена проверка гипотез о принадлежности n анализируемых выборок (X_n) нормальному распределению с использованием статистики критерия Колмогорова-Смирнова:

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|, \quad (2.3)$$

где: $\sup(x)$ – точная верхняя грань множества $X_n = |F_n(x) - F(x)|$; $F_n(x)$ – кумулятивное распределение анализируемой выборки; $F(x)$ – предполагаемое

кумулятивное распределение с известными параметрами, для определения которых использованы значения стандартизированной оценки (z-оценки):

$$z = \frac{x - \bar{x}}{S_x}, \quad (2.4)$$

где: z – стандартизированная оценка величины x ; $\bar{x}$ – среднее значение величины x в выборке; S_x – стандартное отклонение величины x в выборке.

При этом проверяемая нулевая гипотеза предполагает, что рассматриваемые выборки подчиняются нормальному закону распределения случайной величины при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $H_0: F_n(x) = F(x)$. Проверка гипотез выполнялась с использованием программных пакетов статистического анализа IBM SPSS Statistics и MS Excel, результаты расчетов представлены в Таблице 2.7, где D_n – расчетная статистика Колмогорова-Смирнова, D_n^* – квантиль распределения Колмогорова, $N_{ш}$ – объем выборки.

Таблица 2.7 – Результаты расчета критерия Колмогорова-Смирнова

Показатель	Q_i , год ⁻¹	R_i , год ⁻¹	q_{1i} , м ³ /т	q_{2i} , м ³ /мин	h_i , м	m_{di} , т/сут	s_i	a_{1i}	a_{2i}	c_i	e_i
D_n	0,955	0,590	0,921	0,955	0,866	0,807	0,893	0,874	0,860	0,815	0,796
D_n^* , ($\alpha = 0,05$)	0,194	0,194	0,198	0,198	0,215	0,199	0,197	0,232	0,237	0,224	0,215
$N_{ш}$	98	98	94	94	80	93	95	69	66	74	80

Полученные расчетные значения $D_n > D_n^*$, в связи с чем гипотеза H_0 о нормальном распределении отвергается и для анализа статистической значимости влияния факторных признаков на результативные используется тест Краскела-Уоллиса (Kruskal-Wallis H-test), который является непараметрическим аналогом однофакторного дисперсионного анализа. Критерий Краскела-Уоллиса рассчитывается с использованием рангов значений переменных и может быть применен для анализа трех и более независимых групп в случаях [66, 111]:

- неоднородного распределения выборок, отличного от нормального;
- малого объема выборок ($N_{ш} < 100$);

- анализа переменных, определенных на непрерывных и порядковых шкалах;

- если число анализируемых групп $k = 3$, а число наблюдений в группах $n_k \geq 5$;

- если число анализируемых групп $k \geq 4$, общее число наблюдений $n_n \geq 10$ а число наблюдений в группах $n_k \geq 2$.

Для формирования групп переменной $X_1 = \{x_1^1, \dots, x_1^{n_1}\}, \dots, X_k = \{x_k^1, \dots, x_k^{n_k}\}$ из общей выборки использованы интервалы значений группирующей переменной, а присвоение рангов r_i для i -ых значений результативного признака произведено в ходе ранжирования в упорядоченной общей выборке из n_n элементов с выполнением следующего условия:

$$\sum_{i=1}^{n_n} r_i = \frac{n_n(n_n + 1)}{2}. \quad (2.5)$$

Тестовая статистика Краскела-Уоллиса (H_i) использована для выявления статистически-значимого эффекта влияния группирующей переменной на результативный признак путем сравнения среднего ранга каждой из k групп с общим рангом, вычисленным на основе n_n наблюдений:

$$H = \frac{12}{n_n \cdot (n_n + 1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{T_{ri}^2}{n_{ni}} - 3 \cdot (n_n + 1), \quad (2.6)$$

где: T_{ri} – сумма рангов в i -ой группе.

В качестве нулевой гипотезы принимается предположение об отсутствии различий медианных значений в сформированных независимых группах $H_0 : F_1(x) = \dots = F_k(x)$. Для проверки нулевой гипотезы произведено сравнение значений статистики H с критическим значением хи-квадрат χ^2 . Тестовая статистика критерия Краскела-Уоллиса и проверка нулевой гипотезы при уровне значимости $\alpha = 0,05$ выполнялась с использованием программных пакетов статистического анализа IBM SPSS Statistics и MS Excel, результаты расчетов представлены в Таблицах 2.8, 2.9 и в Приложении А.

На основании представленных результатов выявлены статистически-значимые связи на максимальном уровне значимости $\alpha = 0,011$: между среднегодовыми частотами возникновения взрывов метана (Q) и относительной газообильностью шахты (q_1), системой разработки (s) и склонностью пластов к самовозгоранию (c); между наблюдаемыми значениями индивидуального риска (R) и среднегодовыми частотами возникновения взрывов метана (Q).

Таблица 2.8 – Результаты анализа связей факторов с частотой возникновения взрывов метана по тесту Краскела-Уоллиса

Показатель	$R_i, \text{год}^{-1}$	$q_{1i}, \text{м}^3/\text{т}$	$q_{2i}, \text{м}^3/\text{мин}$	$h_i, \text{м}$	$m_{di}, \text{т/сут}$	s_i	c_i
T_{ri}	-	4465	4465	3240	4371	4465	2775
k	-	4	4	4	4	3	3
H_i	-	15,50	3,17	2,58	0,75	14,68	9,09
$\chi^2, (\alpha = 0,05)$	-	9,49	9,49	9,49	9,49	7,81	5,99
α	-	0,004	0,529	0,630	0,645	0,002	0,011

Таблица 2.9 – Результаты анализа связей факторов с наблюдаемым индивидуальным риском по тесту Краскела-Уоллиса

Показатель	$Q_i, \text{год}^{-1}$	$q_{1i}, \text{м}^3/\text{т}$	$q_{2i}, \text{м}^3/\text{мин}$	$h_i, \text{м}$	$m_{di}, \text{т/сут}$	s_i	c_i
T_{ri}	4851	4465	4465	3240	4371	4465	2775
k	4	4	4	4	4	3	3
H_i	23,89	8,69	5,56	1,13	0,87	8,07	3,24
$\chi^2, (\alpha = 0,05)$	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	7,81	5,99
α	$8,4 \cdot 10^{-5}$	0,069	0,234	0,890	0,928	0,045	0,198

Для дальнейшей формализации выявленных связей с использованием регрессионного анализа в сгруппированных выборках рассчитаны усредненные показатели критериальных переменных:

- среднегодовой частоты взрывов метана – $Q_{cp i}$;
- наблюдаемого индивидуального риска поражения персонала при взрывах метана – $R_{cp i}$.

Результаты однофакторного регрессионного анализа представлены на Рисунке 2.2, 2.3, где $r_{\text{кор}}$ – коэффициент корреляции. На Рисунке 2.4, 2.5 представлены распределения усредненных частот взрывов метана в зависимости от системы разработки и склонности пластов к самовозгоранию.

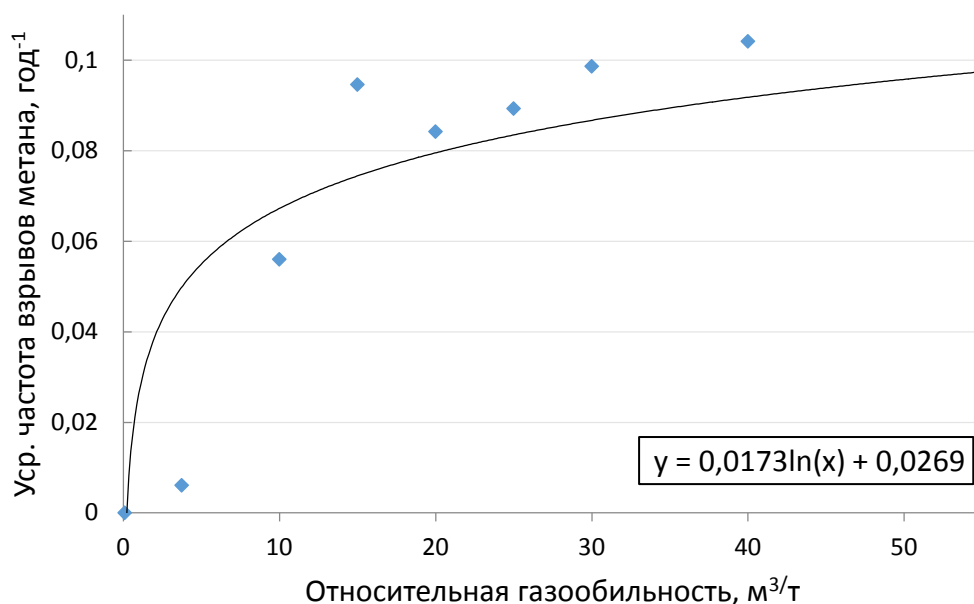


Рисунок 2.2 – Влияние относительной газообильности шахты на усредненную частоту взрывов метана ($r_{\text{кор}} = 0,72$)

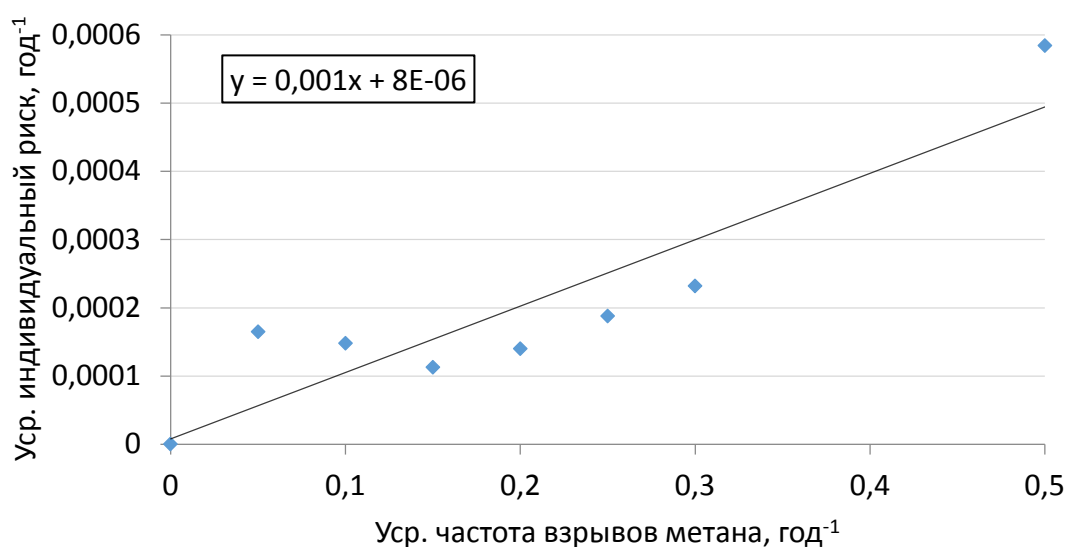


Рисунок 2.3 – Связь индивидуального риска с частотой взрывов метана в период 2005-2016 гг. ($r_{\text{кор}} = 0,88$)

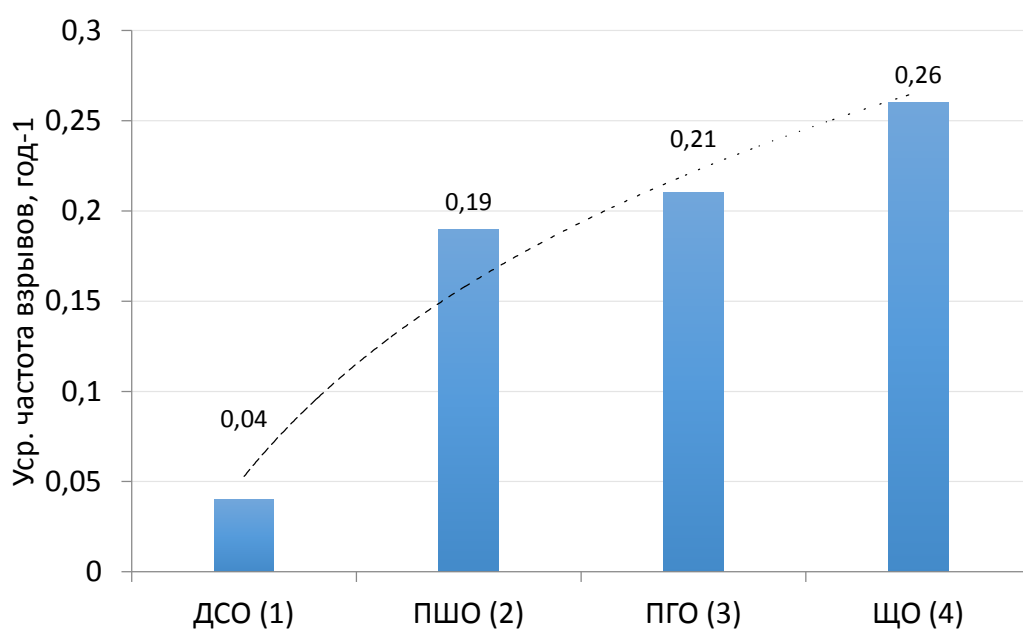


Рисунок 2.4 – Распределение усредненной частоты взрывов метана в зависимости от системы разработки (ДСО – длинными столбами, ПШО – подэтажная отбойка, ПГО – подэтажная гидроотбойка, ЩО – щитовая)

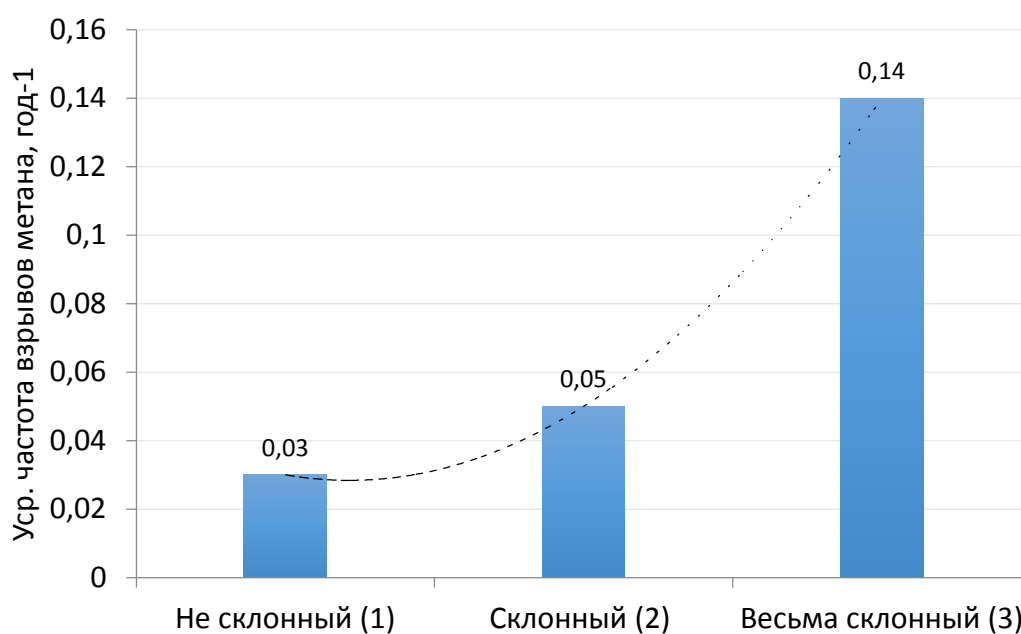


Рисунок 2.5 – Распределение усредненной частоты взрывов метана в зависимости от склонности пластов к самовозгоранию

Выявленные в ходе анализа связи отражают усредненные за период 2005-2016 гг. наблюдаемые показатели риска на шахтах, отнесенных к одной группе по показателю факторного признака, и могут быть использованы при оценке и прогнозе профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана с учетом специфических условий эксплуатации шахты [133].

С целью установления совместного воздействия факторных признаков на результирующий признак, выраженный в виде условного математического ожидания частоты возникновения аварии [17], проведен многофакторный регрессионный анализ. Полученная регрессионная зависимость имеет вид:

$$Q_{pr\ i} = 0,00176 \cdot q_{1i} + 0,03362 \cdot s_i + 0,02302 \cdot c_i - 0,07346, \quad (2.7)$$

где: q_{1i} – относительная газообильность шахты, $\text{м}^3/\text{т}$; s_i – тип системы разработки (ДСО – $s_i = 1$; ПШО – $s_i = 2$; ПГО – $s_i = 3$; ЩО – $s_i = 4$); c_i – склонность пласта к самовозгоранию (Не склонный – $c_i = 1$; склонный – $c_i = 2$; весьма склонный – $c_i = 3$). Анализ качества регрессионной модели проведен на уровне значимости $\alpha = 0,05$ и подтверждает ее адекватность (Таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Результаты анализа качества регрессионной модели

Критерий оценки	Вывод
$t_{табл} = 1,99$; $t_p(q_1) = 2,75 > t_{табл}$, $t_p(s) = 4,21 > t_{табл}$, $t_p(c) = 2,74 > t_{табл}$, где: $t_{табл}$ – табличное значение t-критерия Стьюдента, t_p – расчетное значение t-критерия Стьюдента	Коэффициенты регрессии значимы
$F_{табл} = 2,68$; $F_p(q_1) = 19,26 > F_{табл}$, $F_p(s) = 9,18 > F_{табл}$, $F_p(c) = 6,87 > F_{табл}$, где: $F_{табл}$ – табличное значение F-критерия Фишера, F_p – расчетное значение частного F-критерия Фишера	Включение факторов в модель целесообразно
Максимальный межфакторный коэффициент корреляции $r_{kor}^{max} = 0,49$	Отсутствие мультиколлинеарности между факторными переменными
Коэффициент множественной корреляции $R_K = 0,66$	Наличие заметной связи между результирующей и факторными переменными
Коэффициент детерминации $R_K^2 = 0,44$	Регрессионной моделью объяснено 44 % вариации результирующей переменной

Продолжение таблицы 2.10

Критерий оценки	Вывод
$F_{факт} = 18,04 > 2,68 = F_{табл},$ где $F_{факт}$ – фактическое значение F -критерия Фишера	Коэффициент детерминации статистически значим, полученная регрессионная модель статистически надежна
Расчетное значение RS-критерия $RS = 5,44,$ $RS_{min} = 4,24 < 5,44 < 5,46 = RS_{max}$ где: RS – расчетное значение RS-критерия, RS_{min}, RS_{max} – минимальная и максимальная критическая граница RS-критерия соответственно	Остаточная компонента имеет нормальное распределение

Полученная модель может быть использована для определения прогнозной частоты возникновения взрывов метана с учетом влияния индивидуальных показателей с выявленной статистически-значимой связью. При использовании полученного уравнения регрессии $R = f(Q)$ произведена апробация многофакторной регрессионной модели с получением прогнозных значений индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана на угольных шахтах. Результаты апробации представлены на Рисунке 2.6. При этом произведено обоснование опасности травмирования персонала при взрывах метана с использованием шкалы допустимости риска. Сравнение результатов апробации с фактической статистикой аварийности за 2005-2016 гг. свидетельствует о высокой степени сходимости результатов.

Полученная модель может быть использована для определения прогнозных значений индивидуального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана, а также для ранжирования и выявления угольных шахт, производственная среда которых характеризуется высоким значением профессионального риска. Полученные значения индивидуального риска могут быть использованы в качестве критерия при обосновании опасности угольных шахт по травмированию персонала при взрывах метана с учетом относительной газообильности шахты, системы разработки и склонности пластов к самовозгоранию.

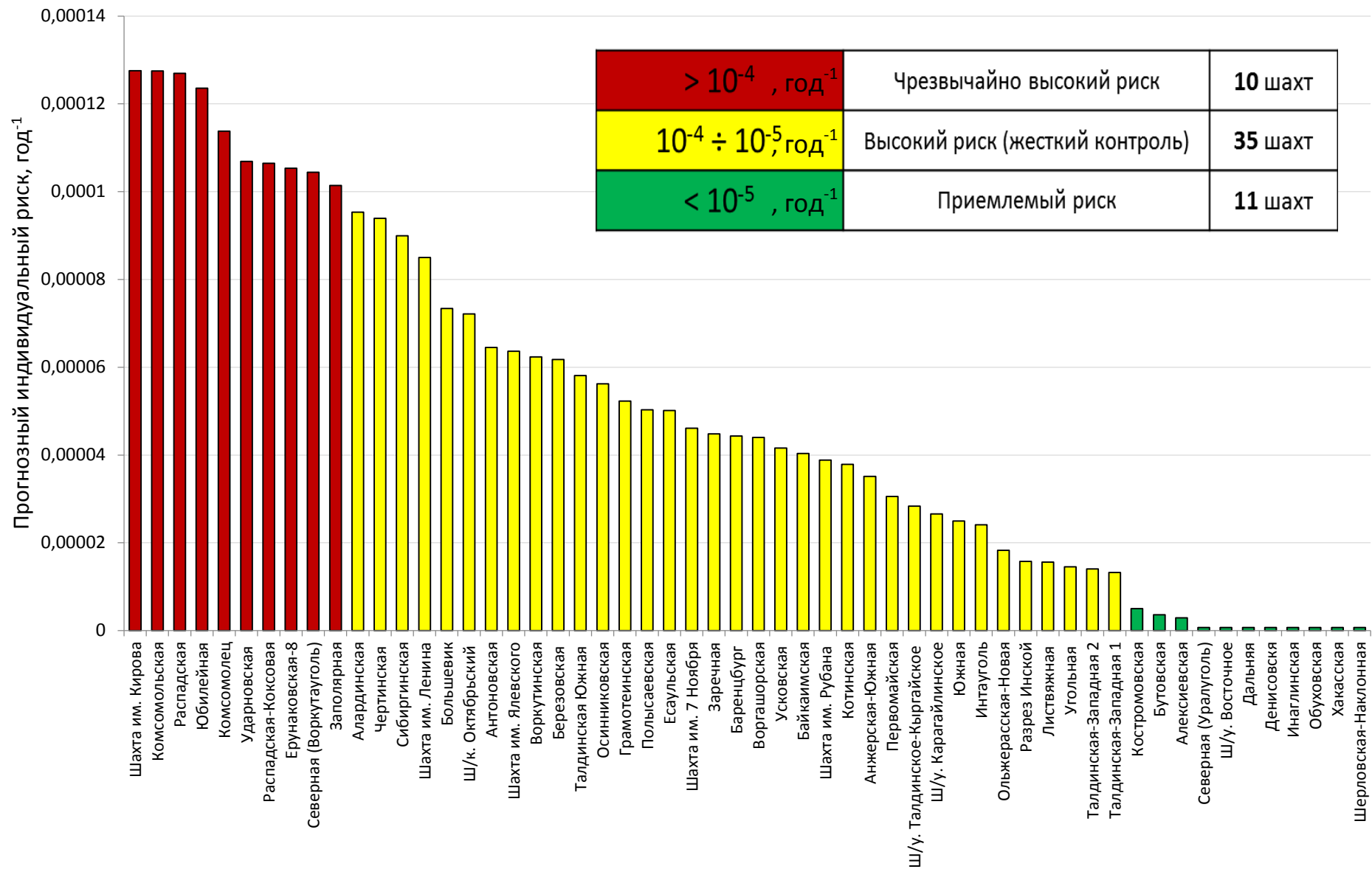


Рисунок 2.6 – Результаты апробации модели множественной регрессии

На основе результатов анализа качества полученной регрессионной модели показано, что использование статистического анализа факторов профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли ограничено информационной неопределенностью исходных данных. Так, сравнительно низкое значение коэффициента детерминации модели указывает на существенное влияние неучтенных факторов, для выявления которых необходимо пополнение базы данных статистических наблюдений за аварийностью и травматизмом, учитывающих динамику показателей комплекса факторов риска. В существующих условиях информационной неопределенности для анализа неучтенных факторов следует использовать результаты математического моделирования и экспертной оценки. При этом значительный интерес представляет задача количественного анализа факторов, влияющих на метановыделение в горные выработки и размер зоны поражения персонала при взрывах метанопылевоздушных смесей.

2.3 Анализ факторов, влияющих на метановыделение в горные выработки

Основными источниками выделений метана в выработки угольных шахт являются разрабатываемые, подрабатываемые и надрабатываемые угольные пласты и пропластки, естественное содержание метана в которых характеризуется показателем природной метаноносности X_m , м³/т. Природная метаноносность угольных пластов зависит, в первую очередь, от степени метаморфизма угля, его сорбционной способности, пористости и трещиноватости, газопроницаемости, локальных условий – угла и глубины залегания пласта. Метан в угольных пластах может находиться в свободном и связанном состоянии (адсорбированный, абсорбированный, растворенный). Так, основной объем метана в угольных пластах находится в сорбированном состоянии на внутренней поверхности угля в многочисленных микропорах – до 90 %, что обусловлено большой площадью их внутренней поверхности и близким расположением молекул метана друг к другу. До 15 % метана находится в виде свободного газа, заполняющего систему

взаимосвязанных пор и трещин (макропор). В обводненных зонах незначительное количество метана растворено в подземных водах. [4, 20].

Доля свободного газа увеличивается до максимальных значений 10-15 % при давлении до 6 МПа на глубинах до 600 м и давлении до 14 МПа на глубинах более 1000 м. В природных условиях в угольных пластах существует динамическое равновесие между свободным и сорбированным метаном. При проведении выработок по угольным пластам происходит перераспределение горного давления в окружающем массиве, вследствие чего нарушаются условия адсорбционного равновесия и происходит изменение сорбционной способности угля согласно уравнению Ленгмюра:

$$\theta = \frac{\alpha_k \cdot p}{1 + \alpha_k \cdot p}, \quad (2.8)$$

где: θ – степень заполнения адсорбционных центров, α_k – константа адсорбционного равновесия, p – давление газа над поверхностью. Изменение напряженного состояния пласта и формирование зон пониженного напряжения и пластических деформаций приводит к увеличению его пористости и трещиноватости на 10-50 % [4], что сопровождается возникновением градиента давления $grad(p)$ и фильтрационным переносом метана в прилегающем массиве:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \text{div} \left[\frac{\rho(p)k}{\mu} \cdot grad(p) \right], \quad (2.9)$$

где: t – время; ρ , p , μ – плотность, давление и вязкость метана в массиве; k – газовая проницаемость массива [44]. В результате десорбции метана в угле и интенсификации процессов фильтрационного переноса в зоне влияния горных работ, происходит частичная дегазация пласта с выделением метана в воздух прилегающих горных выработок из различных источников.

Для учета влияния источников метановыделения в модели расчета численных показателей профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, произведена количественная оценка влияния различных горно-геологических и горнотехнических факторов на интенсивность метановыделения с использованием расчетной модели прогноза

метанообильности горных выработок, приведенной в Руководстве [97]. При проведении численных экспериментов учитывались горно-геологические условия шахт Кузнецкого угольного бассейна.

В исследовании [42] установлено, что начальная скорость газовыделения $I_{yд.н.} (м^3/(м^2 \cdot мин))$ принимает максимальное значение в момент обнажения пласта, а ее изменение во времени может быть описано в виде экспоненциальной зависимости:

$$I_{yд.н.} = I_{yд.н.} \cdot \exp\left(-\frac{0,5 \cdot t}{t_y}\right), \quad (2.10)$$

где: $I_{yд.н.}$ – метановыделение с поверхности пласта в момент времени t , $м^3/(м^2 \cdot мин)$, t_y – период процесса релаксации ламинарной фильтрации метана в угольном пласте, мин. В соответствии с чем, до 25 % выделений метана в структуре газового баланса выемочного поля происходит в очистных и подготовительных выработках в результате непрерывного обнажения пласта [58].

Количество метана, выделяющееся из разрабатываемого пласта, определяется зависимостью от скорости подвигания забоя, поскольку при быстрых темпах разработки происходит изменение геомеханических процессов и увеличение газоотдачи с обнаженной поверхности пласта [114]. При этом наблюдается увеличение абсолютного метановыделения в призабойное пространство лавы и снижение относительного метановыделения очистной выработки [55], определяемого согласно выражению:

$$q_{nl} = X_m \cdot k_{nl} \cdot e^{-p_v}, \quad (2.11)$$

где: q_{nl} – относительное метановыделение из разрабатываемого пласта в очистной забой в процессе выемки угля, $м^3/т$; k_{nl} – коэффициент, учитывающий влияние системы разработки, длины очистного забоя и ширины условного пояса газового дренирования; p_v – показатель, зависящий от скорости подвигания очистного забоя и выхода летучих:

$$k_{nl} = \frac{l_{оч} \pm 2B_g}{l_{оч}}. \quad (2.12)$$

$$p = v_{oc} \cdot 0,21 \cdot (0,002 \cdot (27 - V_{daf})^2 + 1), \quad (2.13)$$

где: l_{oc} – длина очистного забоя, м; B_g – ширина условного пояса газового дренирования, м; v_{oc} – скорость подвигания очистного забоя, м/сут; V_{daf} – выход летучих, %. С увеличением скорости подвигания забоя происходит рост метановыделения из отбитого угля. Так, в зависимости от фракции отбитого угля и времени его транспортирования, до 80 % содержащегося в нем метана выделяется в воздух добычного участка [115]. Прогнозное метановыделение из отбитого угля в очистной забой (при двухсторонней выемке угля) определяется согласно выражению:

$$q_{oy} = X_m \cdot k_{nl} \cdot (1 - e^{-p}) \cdot a_2 \cdot T_T^{b_2}, \quad (2.14)$$

где: a_2 и b_2 – коэффициенты, характеризующие газоотдачу из отбитого угля; T_T – время транспортирования угля с момента отторжения от массива до выдачи за пределы очистного забоя, мин:

$$T_T = \frac{l}{60 \cdot v_T}, \quad (2.15)$$

где: l – длина участка транспортирования угля, м; v_T – скорость транспортирования угля на участке, м/с. Результаты расчета прогнозного метановыделения в очистной забой из пласта и отбитого угля с учетом влияния природной метаноносности угля и скорости подвигания забоя представлены на Рисунке 2.7 и Рисунке 2.8.

Прогнозное метановыделение с неподвижных обнаженных поверхностей $I_{нов}$ (м³/мин) в подготовительный забой определяется в соответствии с выражением:

$$I_{нов} = 0,0015 \cdot m_n \cdot \beta \cdot v_n \cdot (X_m - X_0)^2, \quad (2.16)$$

где: m_n – мощность пласта, м; v_n – проектная скорость подвигания забоя тупиковой выработки, м/сут; β – коэффициент, учитывающий условия фильтрации метана; X_0 – остаточная метаноносность угля, оставляемого в невынимаемых пачках и целиках, м³/т.

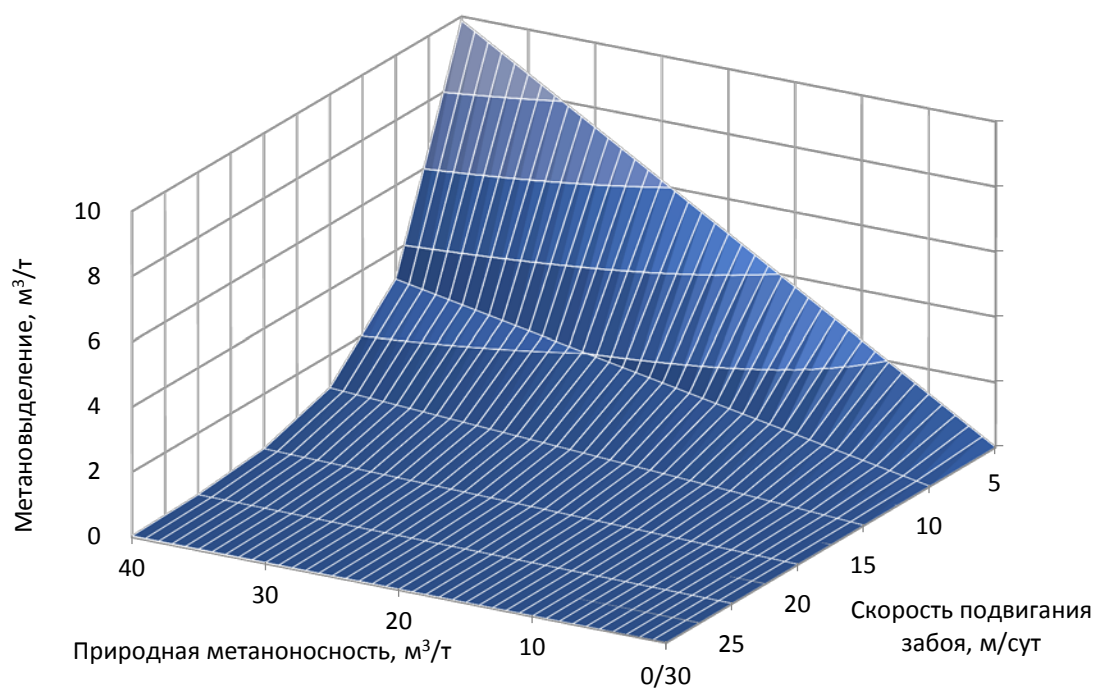


Рисунок 2.7 – Влияние природной метаноносности угля и скорости продвижения очистного забоя на прогнозное метановыделение в очистную выработку из пласта

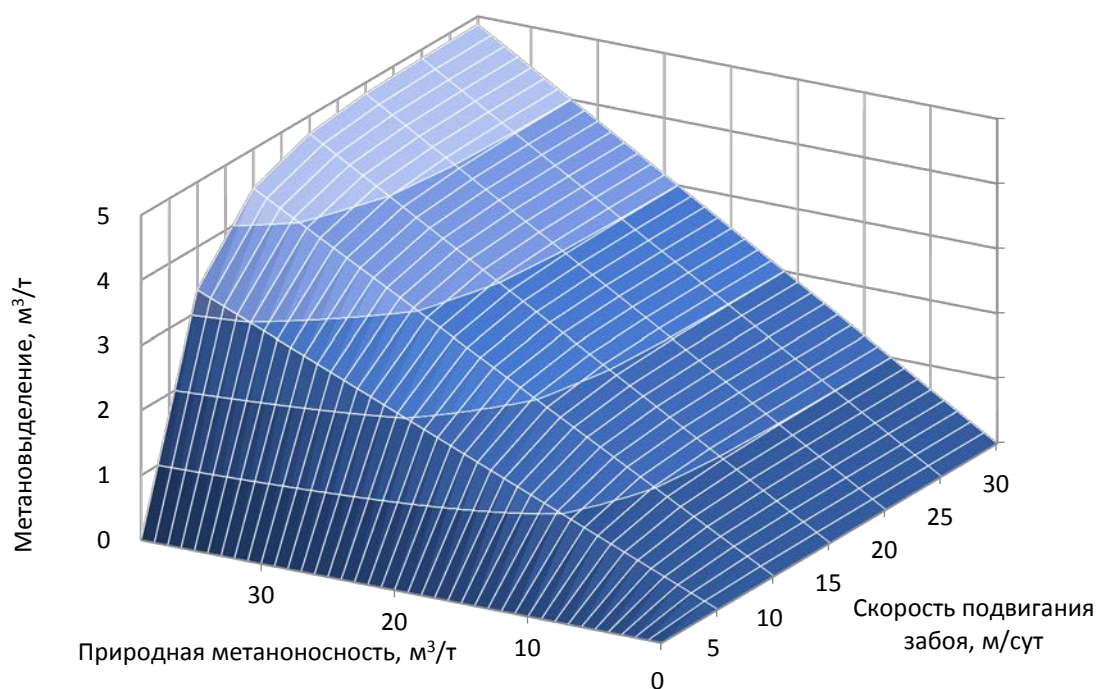


Рисунок 2.8 – Влияние природной метаноносности угля и скорости продвижения очистного забоя на прогнозное метановыделение в очистную выработку из отбитого угля

Результаты расчета прогнозных значений $I_{нов}$ в зависимости от природной метаноносности при различных скоростях подвигания забоя представлены на Рисунке 2.9.

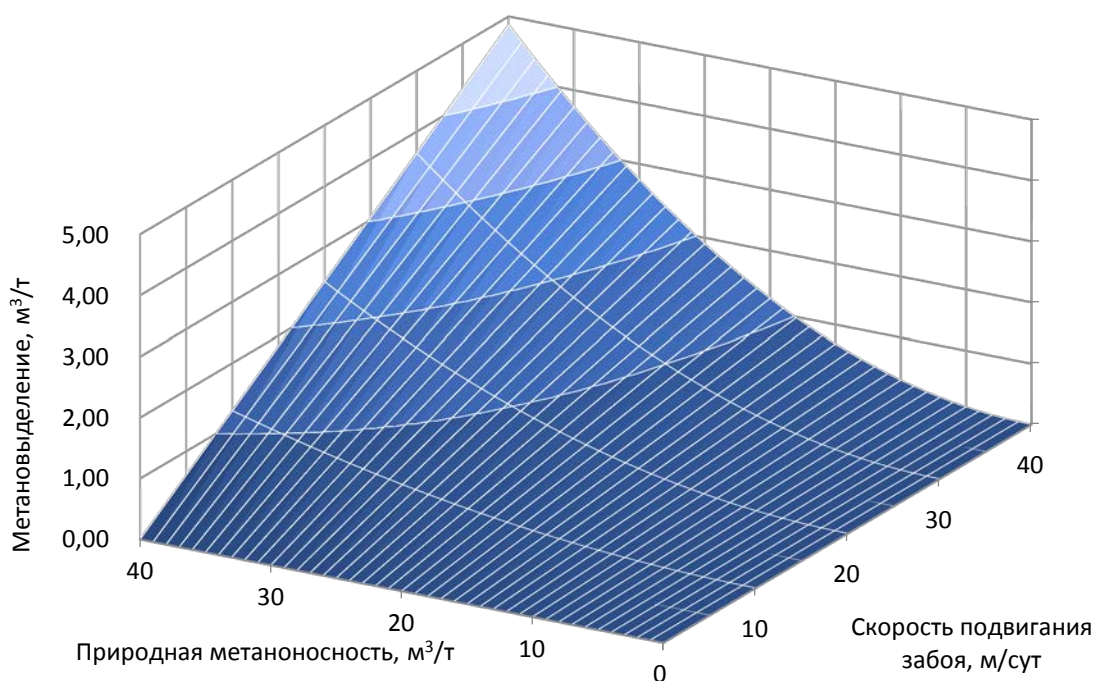


Рисунок 2.9 – Влияние природной метаноносности угля и скорости подвигания подготовительного забоя на прогнозное метановыделение в выработку из неподвижной поверхности пласта

Прогнозное метановыделение из отбитого угля в подготовительный забой:

$$I'_{oy} = (X_m - X_0) \cdot j \cdot k_{Ty}, \quad (2.17)$$

где: I'_{oy} – метановыделение из отбитого угля при комбайновом способе проходки, м³/мин; j – техническая производительность комбайна, т/мин; k_{Ty} – коэффициент, учитывающий степень дегазации отбитого угля. Использование выражения (2.17) позволяет определить прогнозное метановыделение из отбитого угля с учетом природной метаноносности и производительности комбайна (Рисунок 2.10).

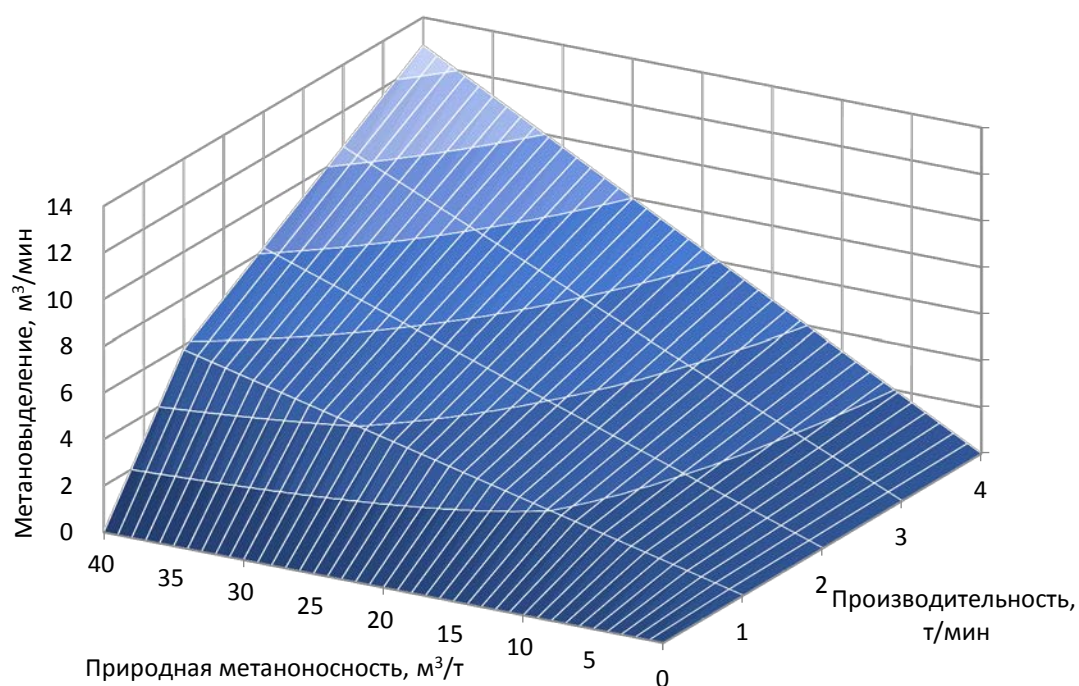


Рисунок 2.10 – Влияние природной метаносности угля и производительности проходческого комбайна на прогнозное метановыделение в подготовительную выработку из отбитого угля

В результате неоднородности геолого-генетических условий торфонакопления и углеобразования [47] в массиве могут формироваться локальные зоны аномально-высокого пластового давления с повышенной газоносностью угольных пластов и пород, вскрытие которых может привести к образованию суфлярных выделений [20]. Интенсивность истечения газа из геологических и эксплуатационных суфляров может достигать значений 8500 м³/сут [12], что делает необходимым учет опасности пластов по суфлярным выделениям при проведении оценки и прогноза риска загазирования выработок. Порядок определения опасности пластов по суфлярным выбросам приведен в [84]. При вскрытии зон аномально-высокого пластового давления с развитыми геологическими нарушениями газоносных угольных пачек и пониженной прочностью углей может происходить быстрое изменение напряженного состояния краевой части пласта, сопровождающееся внезапным выбросом угля, породы и газа в подготовительный или очистной забой. Причем

выбросоопасность возрастает с усложнением тектонического строения шахтного поля, развитием пликативных и дизъюнктивных нарушений [12]. Внезапные выбросы сопровождаются быстроразвивающимся разрушением массива, отбросом горной массы и выделением газа, что также может привести к загазированию выработок и последующему возникновению взрыва метана. Порядок определения опасности пластов и их участков по внезапным выбросам приведен в [37].

В массиве горных пород в области влияния очистной выработки над и под выработанным пространством происходит перераспределение горного давления в прилегающем массиве и формирование зон деформаций (Рисунок 2.11). При этом в разгруженных зонах происходит развитие трещиноватости и открытопористой структуры с протяженными каналами течения газа, что приводит к увеличению газопроницаемости массива, истечению свободного метана в выработанное пространство по трещинам и пустотам из невынимаемых пачек угля, вмещающих пород и сближенных пластов [1, 4, 94].

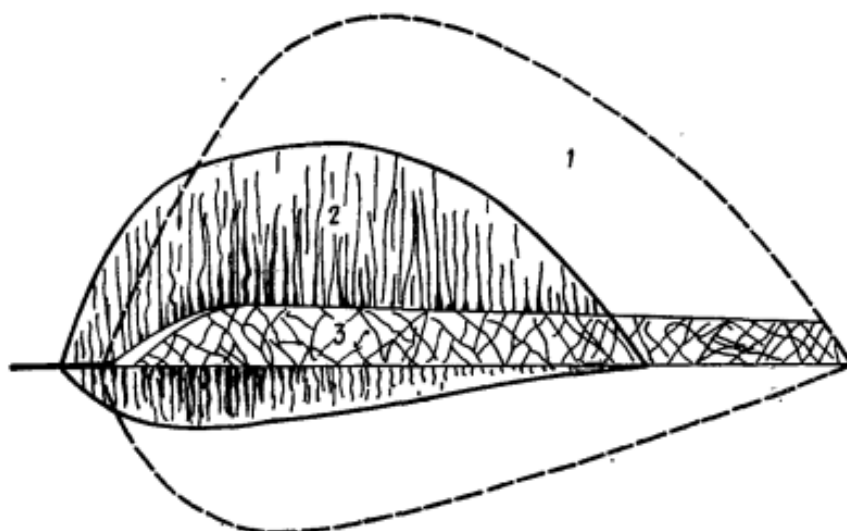


Рисунок 2.11 – Зоны деформаций пород, вызванных очистными работами (где: 1 – зона пониженных напряжений, 2 – зона трещиноватости, 3 – зона обрушения) [1]

В результате возникновения утечек, через выработанное пространство происходит вынос накапливаемого в нем метана. При этом конфигурация

фильтрационных потоков в выработанном пространстве и интенсивность метановыделений в воздух выработок во многом зависят от схемы вентиляции участков [94] (Рисунок 2.12). В результате, до 80 % объема метана, поступающего на выемочный участок, выделяется через выработанное пространство: до 50 % из подрабатываемых пластов, до 20 % из надрабатываемых пластов, до 10 % из вмещающих пород [99].

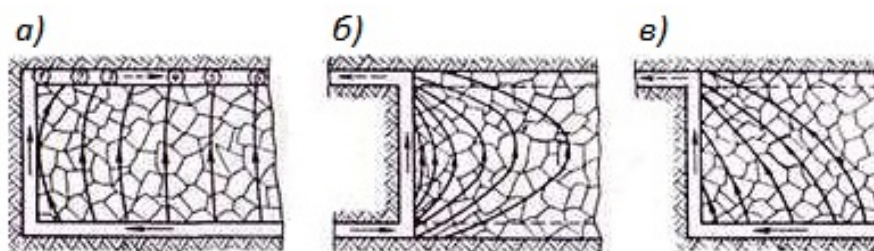


Рисунок 2.12 – Линии тока в выработанном пространстве при утечках (а – при сплошной системе разработки, б – при столбовой, в – при прямоточной) [1]

Прогнозное метановыделение из сближенных пластов-спутников q_{cn} ($\text{м}^3/\text{т}$) определяется согласно выражению:

$$q_{cn} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{m_i}{m_n} \cdot (X_{cn.i} - X_{0i}) \cdot \left(1 - \frac{M_{cn.i}}{M_p} \right) \right], \quad (2.18)$$

где: n – количество надрабатываемых и/или подрабатываемых пластов-спутников; m_i – суммарная мощность угольных пачек i -го спутника, м; $X_{cn.i}$ и X_{0i} – природная и остаточная метаноносность i -го спутника соответственно, $\text{м}^3/\text{т}$; $M_{cn.i}$ – расстояние по нормали между разрабатываемым и i -ым пластом-спутником, м; M_p – расстояние по нормали между разрабатываемым и i -ым пластом-спутником, при котором метановыделение не происходит, м:

$$M_p = k_{ук} \cdot m_n \cdot (1,2 + \cos \alpha_{nl}), \quad (2.19)$$

где: $k_{ук}$ – коэффициент, учитывающий влияние способа управления кровлей; α_{nl} – угол падения пласта, градус. Влияние природной метаноносности пласта-спутника, его мощности и расстояния до разрабатываемого пласта на прогнозное метановыделение в очистную выработку представлено на Рисунке 2.13.

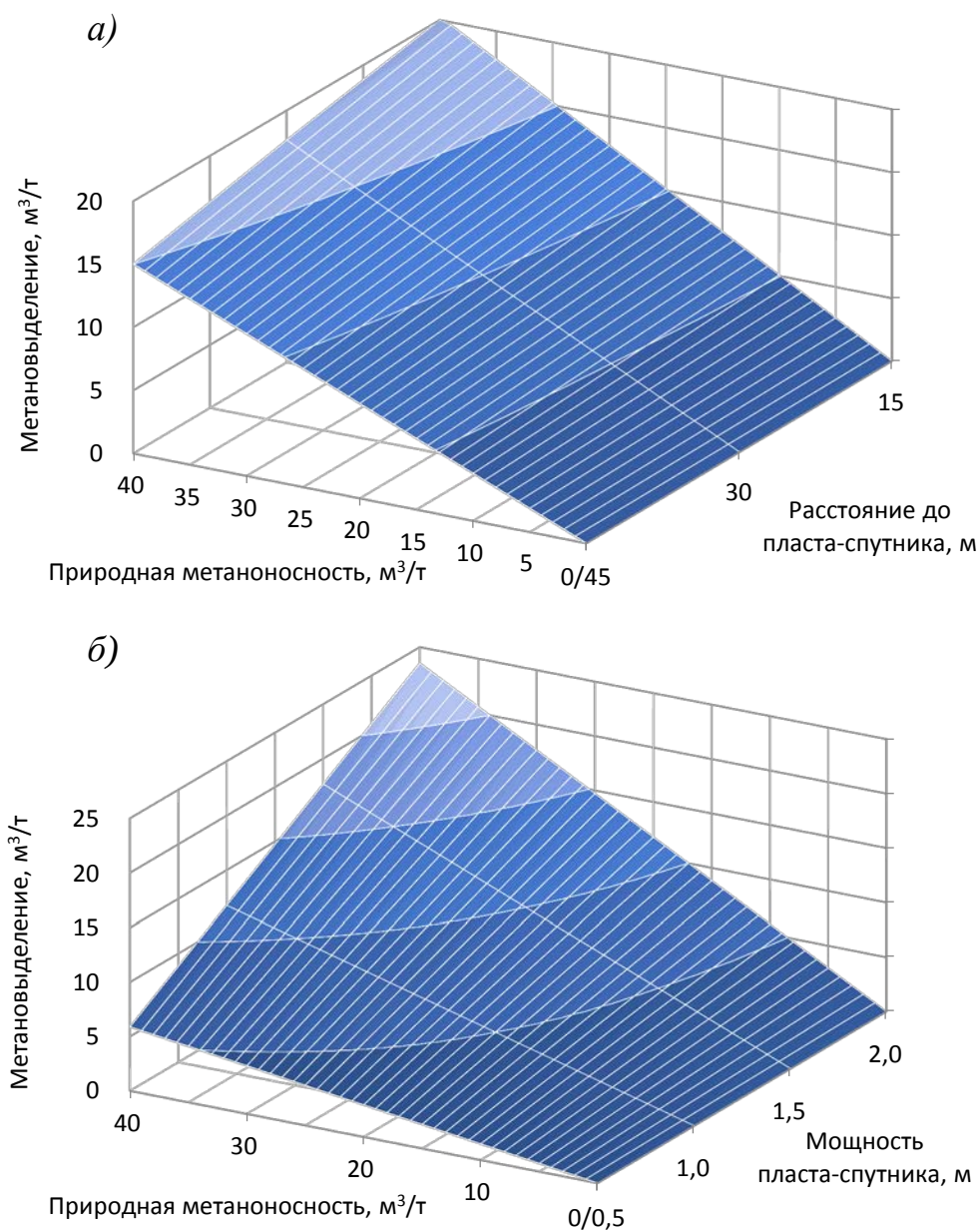


Рисунок 2.13 – Влияние природной метаноносности угля на прогнозное метановыделение из пласта-спутника в очистную выработку с учетом: *а* - расстояния до пласта-спутника, *б* - мощности пласта-спутника

По мере отступления очистного забоя от монтажной камеры и увеличения размера выработанного пространства объем газового коллектора увеличивается, что приводит к изменению динамики метанообильности выемочных участков [91, 121]. При этом ранее отработанные выемочные столбы также оказывают влияние на метанообильность выемочного участка. Кроме того, газовыделение из выработанного пространства зависит от процессов обрушения непосредственной

и основной кровли. Так, способ управления кровлей определяет параметры существования зон изменения напряженного состояния окружающих пород и разрабатываемого пласта, что оказывает влияние на интенсивность выделения метана на выемочном участке. Также скачкообразные изменения метановыделения в выработки могут происходить при неравномерном подвигании очистного забоя.

Непосредственное влияние на интенсивность метановыделений в выработки участка оказывает дегазация i -го источника метановыделения, характеризующаяся значением коэффициента дегазации k_{di} [77]:

$$k_{di} = \frac{G_{di}}{I_i}, \quad (2.20)$$

где: G_{di} – дебит метана, извлекаемого средствами дегазации из i -го источника, м³/мин; I_i – метановыделение на участке из i -го источника метановыделения, м³/мин. Влияние природной метаноносности разрабатываемых пластов и пластов-спутников на метанообильность выемочного участка с учетом дегазации представлено на Рисунке 2.14.

Относительная метанообильность выемочного участка $q_{уч}$ (м³/т) при схемах проветривания с обособленным разбавлением метана по источникам выделения с учетом эффективности дегазации разрабатываемого пласта $k_{д.н.}$, подрабатываемого $k_{д.н.н.}$ и надрабатываемого $k_{д.н.н.}$ пластов:

$$q_{уч} = q_{oy} \cdot (1 - k_{д.н.}) + q_{нл} \cdot (1 - k_{д.н.}) + q_{в.н.}, \quad (2.21)$$

$$q_{в.н.} = (q_{н.н.} + q_{нор}) \cdot (1 - k_{д.н.н.}) + q_{н.н.} \cdot (1 - k_{д.н.н.}) + k_{эн} \cdot (X_m - X_0) \cdot (1 - k_{д.н.}), \quad (2.22)$$

где: $q_{вн}$ – относительное метановыделение из выработанного пространства в пределах выемочного участка, м³/т; $q_{н.н.}$ – относительное метановыделение из подрабатываемого пласта, м³/т; $q_{н.н.}$ – относительное метановыделение из надрабатываемого пласта, м³/т; $k_{эн}$ – коэффициент, учитывающий метановыделение из эксплуатационных потерь в пределах выемочного участка.

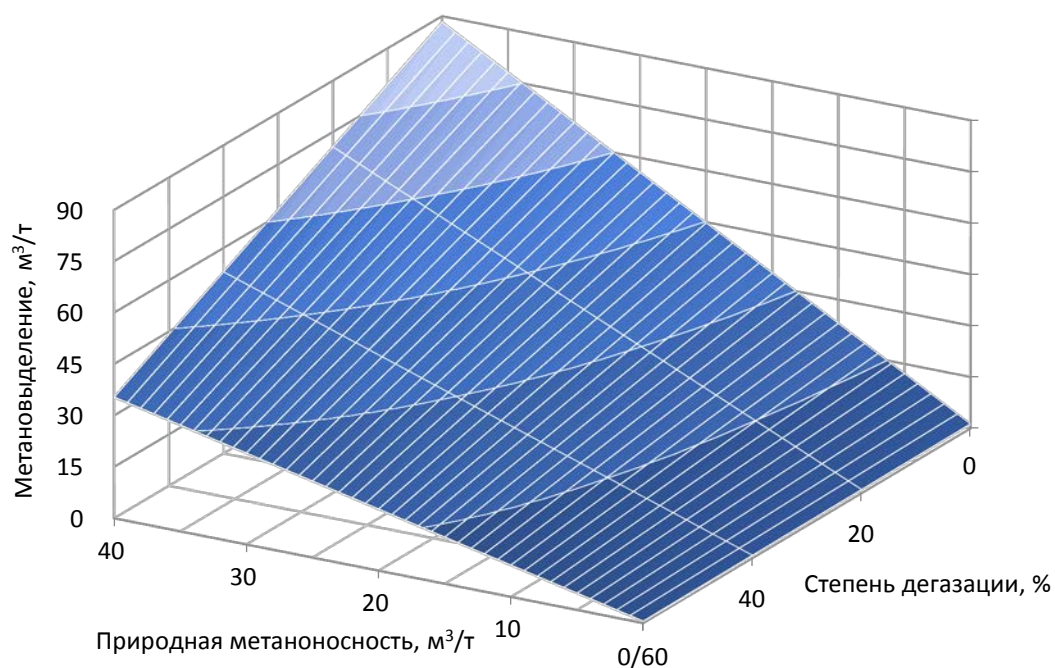


Рисунок 2.14 – Влияние природной метаноносности угля и степени дегазации разрабатываемого пласта и пласта-спутника на метанообильность выемочного участка

Таким образом, в ходе анализа математической модели прогноза метанообильности выработок установлено влияние основных горно-геологических и горнотехнических факторов на интенсивность выделений метана из основных источников в очистные и подготовительные забои: природной метаноносности и мощности разрабатываемого пласта; скорости подвигания забоя; природной метаноносности, мощности и положения пласта-спутника; степени дегазации разрабатываемого пласта и пласта-спутника. Установленные количественные зависимости позволяют осуществить прогноз метанообильности выработок при вероятностной оценке поражающего воздействия взрывов, а также при комплексной оценке и прогнозе профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли.

2.4 Вероятностная оценка травмирования персонала при взрывах метана и пыли

Травмирование персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли происходит при реализации условий возникновения взрыва и последующего воздействия опасных факторов взрыва на горнорабочих. Соответственно, величина профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли должна учитывать результаты вероятностной оценки поражающего воздействия взрывов. Согласно классификации, приведенной в [21], к опасным производственным факторам, возникающим в результате взрывов метана и пыли в выработках угольных шахт, относят:

1. Факторы, обладающие свойствами физического воздействия на организм человека – ударные волны воздушной среды и тепловое излучение зон горения и фронта пламени;
2. Фактор, обладающий свойствами химического воздействия на организм человека – газообразные токсичные (ядовитые) вещества, образуемые в процессе горения.

В ходе анализа ГНС [110], произошедших на шахтах Кузбасса в 1997-2011 гг., установлено распределение причин гибели горнорабочих при воздействии опасных факторов в результате взрывов метана и пыли (Таблица 2.11).

Приведенные данные свидетельствуют, что подавляющее большинство проанализированных случаев смертельного травмирования персонала произошло при воздействии воздушных ударных волн взрывов. В связи с чем, в настоящем исследовании данный опасный фактор рассматривается в качестве основного фактора, определяющего величину ущерба при оценке и прогнозе профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли. Согласно [69], поражающее действие ударных волн определяется избыточным давлением во фронте волны ΔP_ϕ (МПа) и временем его воздействия (фазой сжатия) τ (с). При этом значение ΔP_ϕ в расчетной точке зависит от:

- избыточного давления во фронте ударной волны в зоне взрыва ΔP , МПа;

- длины пути распространения ударной волны по прямолинейным участкам выработок x_l , м;

- параметров прямолинейных участков движения ударной волны: периметров $П$ (м) и площадей сечения S (м²) выработок; значений коэффициента аэродинамического сопротивления выработок α_a (кг·с²/м⁴);

- параметров местных сопротивлений: вида сопротивлений; величин угла поворота или сопротивления γ (градус); отношений площадей поперечных сечений выработок δ (доли ед.).

Таблица 2.11 – Воздействие поражающих факторов взрывов метана и пыли на пострадавших [110]

Вид поражения	Причина	Воздействие опасного фактора на пострадавших, %	Причина гибели, %
Сочетанные травмы: различные повреждения тела, черепно-мозговые травмы, переломы	Динамическое воздействие ударных волн	62	53
Отравления газообразными веществами	Воздействие токсических продуктов горения, термического разложения и взрыва	47	46
Ожоги различной степени тяжести	Воздействие высокой температуры	28	1

Анализ приведенных в [3, 46] данных свидетельствует о возможности превышения указанного в [69] значения избыточного давления во фронте ударной волны в зоне взрыва $\Delta P = 1,6$ МПа до уровня $\Delta P = 5,0$ МПа и более. В соответствии с [23, 61], расчетная величина ΔP может быть установлена с учетом величины эффективного энергозапаса взрывчатой смеси, которая зависит от объема смеси и содержания в ней метана и угольной пыли:

$$\Delta P = P_0 \cdot \exp(-1,124 - 1,66 \cdot \ln(R_x) + 0,260 \cdot \ln(R_x)^2), \quad (2.23)$$

$$R_x = \frac{R_l}{(E / P_0)^{1/3}}, \quad (2.24)$$

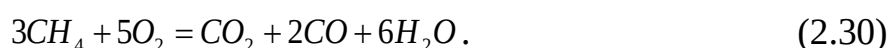
$$E = \sum_{i=1}^2 (E_i \cdot m_i), \quad (2.25)$$

$$m_{CH_4} = \begin{cases} V_c \cdot \rho_{CH_4} \cdot C_{CH_4}, & C_{CH_4} \leq C_{CH_4}^{cm} \\ V_c \cdot \rho_{CH_4} \cdot C_{CH_4}^{cm} / C_{CH_4}, & C_{CH_4} > C_{CH_4}^{cm} \end{cases}, \quad (2.26)$$

$$m_C = \begin{cases} V_c \cdot C_{пыль} / 1000 \cdot C_C, & (C_{пыль} \cdot C_C) \leq C_C^{cm} \\ V_c \cdot \frac{C_C^{cm}}{C_{пыль} \cdot C_C \cdot 1000}, & (C_{пыль} \cdot C_C) > C_C^{cm} \end{cases}, \quad (2.27)$$

где: P_0 – атмосферное давление, Па; R_x – безразмерное расстояние от центра взрывоопасной смеси; R_l – фактическое расстояние от центра взрывоопасной смеси, м; E – эффективный энергозапас смеси, Дж; E_i – удельная теплота сгорания i -го вещества, Дж/кг; m_i – масса i -го вещества в смеси (m_{CH_4} и m_C – масса метана и масса пыли в пересчете на углерод соотв.), кг; V_c – объем взрывоопасной смеси, м³; ρ_{CH_4} – плотность метана, кг/м³; C_{CH_4} – концентрация метана в смеси, % об.; $C_{CH_4}^{cm}$ – стехиометрическая концентрация метана, % об.; $C_{пыль}$ – концентрация пыли в смеси, г/м³; C_C – содержание углерода в пыли, доли ед.; $C_{пыль}^{cm}$ – стехиометрическая концентрация пыли, г/м³.

Для определения взрывчатости смеси необходимо учитывать концентрационные пределы взрываемости ее компонентов. Известно, что МВС становится опасной по воспламенению в пределах $5,0 \% < C_{CH_4} < 16,0 \%$ и в пределах $6,3 \% < C_{CH_4} < 13,5 \%$ по детонации [13]. При этом взрыв происходит по одной из основных стехиометрических реакций горения:



При анализе уравнений реакций (2.28-2.30) [3] обнаружен нижний стехиометрический предел взрываемости (НСПВ) метана на уровне $C_{CH_4} = 9,5 \%$ (соотв. реакции (2.28)), верхний стехиометрический предел взрываемости (ВСПВ) – на уровне $C_{CH_4} = 12,28 \%$ (соотв. реакции (2.30)). Взрывчатость пылевоздушной

смеси (ПВС) зависит от концентрации угольной пыли в воздухе, ее дисперсионного состава, выхода летучих и содержания минеральных негорючих веществ [3, 67, 101]. Абсолютные значения пределов взрываемости ПВС находятся в диапазоне от 10 г/м³ до 2000 г/м³ и более [93]. Основные стехиометрические реакции сгорания углерода угольной пыли при взрывах ПВС:



Так, ВСПВ чистого углерода $[C]=178,25$ г/м³ соответствует реакция (2.31), происходящая с его полным окислением в условиях избытка кислорода, НСПВ $[C]=96,25$ г/м³ соответствует реакция (2.32), при которой происходит недоокисление углерода с образованием угарного газа [3]. В реальных условиях угольных шахт при одновременном поступлении метана и пыли в рудничный воздух формируются метанопылевоздушные смеси (МПВС), в которых наблюдается синергетический эффект снижения нижнего предела взрываемости (НПВ) пылегазовой композиции относительно НПВ метана и угольной пыли в воздухе по отдельности [41]. В МПВС адсорбированный на поверхности частиц угольной пыли метан увеличивает в их газовой оболочке концентрацию газообразных продуктов пиролиза, а неадсорбированный метан равномерно распределяется между частицами, что способствует передаче теплового импульса в объеме МПВС и интенсификации цепной реакции горения [67]. В исследованиях [41] определена зависимость НПВ угольной пыли в МПВС от содержания в ней метана, представленная на Рисунке 2.15 и описываемая эмпирическим выражением:

$$C_{yn}^{CH_4} = 53,5 \cdot \exp(-0,045 \cdot V_{daf} - 0,69 \cdot C_{CH_4}) + 1,4 \cdot \exp(-0,032 \cdot V_{daf}) \cdot A_d, \quad (2.33)$$

где: $C_{yn}^{CH_4}$ – НПВ угольной пыли в присутствии метана, г/м³; A_d – зольность угля, %.

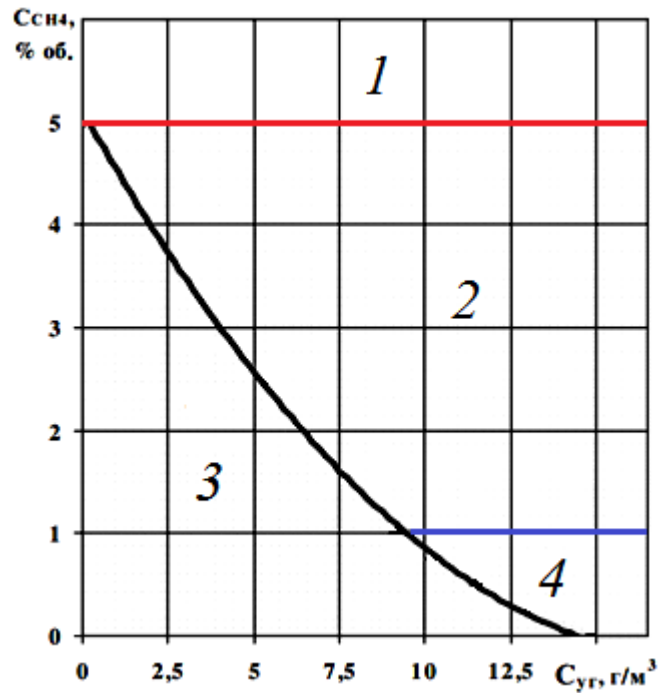


Рисунок 2.15 – НПВ угольной пыли в МПВС при различных концентрациях метана, где $C_{уг}$ – концентрация угольной пыли, г/м³ [41]

При возникновении источника инициирования в МПВС в первую очередь воспламеняется метан, что соответствует области 1 на Рисунке 2.15. Взрывчатость МПВС в области 2 определяется соотношением концентрации метана и угольной пыли. Композиции МПВС в области 3 не являются взрывчатыми. МПВС в области 4 обладают взрывчатостью, однако концентрации метана и пыли в данных смесях могут находиться в пределах, допускаемых действующими Правилами безопасности [85]. В соответствии с чем, допустимую концентрацию метана $C_{CH_4}^{don'}$ (% об.) необходимо определять с учетом содержания взвешенной пыли в воздухе [3]:

$$C_{CH_4}^{don'} = \left(1 - \frac{C_{yn}}{P_{yn}^{don}}\right) \cdot C_{CH_4}^{don}, \quad (2.34)$$

где: C_{yn} – концентрация угольной пыли, г/м³; P_{yn}^{don} – НПВ угольной пыли в смеси, г/м³; $C_{CH_4}^{don}$ – допустимая Правилами безопасности концентрация метана, % об.

Разбавление концентраций метана в рудничном воздухе до приемлемых значений достигается в первую очередь за счет проветривания горных выработок.

Согласно [97] установлены расчетные значения расхода воздуха для вентиляции участков и выработок: по газовому фактору на 1 м^3 выделившегося метана необходимо подать 133 м^3 чистого воздуха для разбавления воздушной смеси в исходящей струе до уровня $C_{\text{CH}_4} = 0,75 \%$. Использование выражений (2.23-2.27) для расчета стехиометрических концентраций с учетом степени разбавления метана в рудничном воздухе за счет проветривания позволяет установить зависимость избыточного давления во фронте ударной волны в зоне взрыва ΔP от показателя эффективного энергозапаса смеси E , представленную на Рисунке 2.16, а также зависимость ΔP от содержания в МПВС метана m_{CH_4} и пыли m_{C} , представленную на Рисунке 2.17.

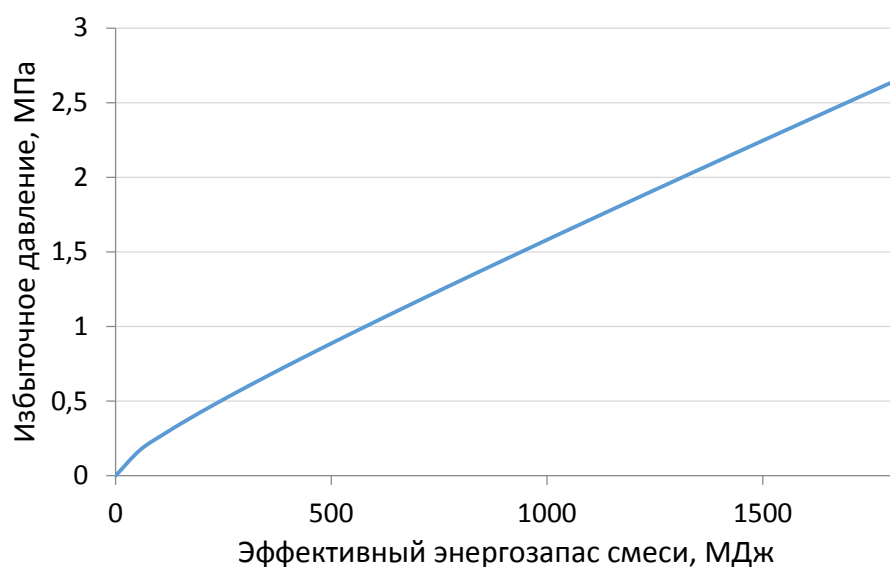


Рисунок 2.16 – Влияние эффективного энергозапаса смеси на величину избыточного давления во фронте ударной волны на границе зоны взрыва

С учетом полученного значения ΔP может быть определено изменение избыточного давления в переднем фронте ударной волны при ее распространении по прямолинейным участкам выработок на расстояние x_l от зоны взрыва – ΔP_x (МПа), и при прохождении местных сопротивлений – ΔP_R (МПа) [69]:

$$\Delta P_x = \Delta P_\phi \cdot \exp\left(-k_z \cdot \frac{\Pi}{S} \cdot x\right), \quad (2.35)$$

где: ΔP_ϕ – избыточное давление во фронте ударной волны в начале прямолинейного участка, МПа; k_z – безразмерный коэффициент затухания:

$$k_z = [4,1 - 3,1 \cdot \exp(-3\Delta P_\phi)] \cdot \alpha_a. \quad (2.36)$$

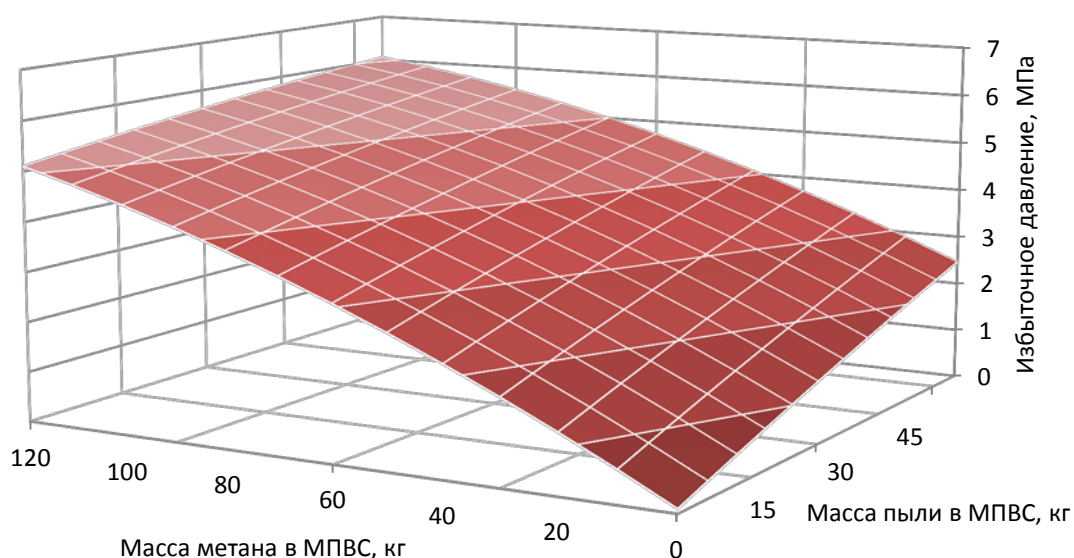


Рисунок 2.17 – Влияние содержания метана и пыли в МПВС на величину избыточного давления во фронте ударной волны на границе зоны взрыва

Изменение избыточного давления в переднем фронте ударной волны ΔP_R , МПа после поворота (сопряжения, сужения) определяется по формуле:

$$\Delta P_R = \frac{0,4A - 0,29 + \sqrt{(0,4A - 0,29)^2 + 2,8A}}{4,8}, \quad (2.37)$$

где: A – величина, определяемая в зависимости от вида местного сопротивления согласно [69].

Установленные с учетом выражений (2.35-2.37) значения показателя ΔP в расчетных точках, расположенных по мере удаления от зоны взрыва, позволяют осуществить оценку вероятности летального исхода человека в заданных точках при барическом воздействии ударной волны с использованием пробит-функции [18]:

$$Pr = 5 - 5,74 \cdot \ln \left(\frac{4,2}{1 + \Delta P_x / P_0} + \frac{1,3 \cdot P_0^{0,5} \cdot m^{0,33}}{I_+} \right), \quad (2.38)$$

где: m – масса человека, кг; I_+ – импульс фазы сжатия, Па·с:

$$I_+ = P_0^{0,67} \cdot E^{0,33} \cdot \frac{\exp(-3,4217 - 0,898 \cdot \ln(R_x) - 0,009 \cdot \ln(R_x)^2)}{C_0}, \quad (2.39)$$

где: C_0 – скорость звука в воздухе, м/с.

Значения вероятности гибели человека от динамического воздействия ударной волны при взрывах МПВС, полученная на основе выражений (2.38-2.39), представлена на Рисунке 2.18.

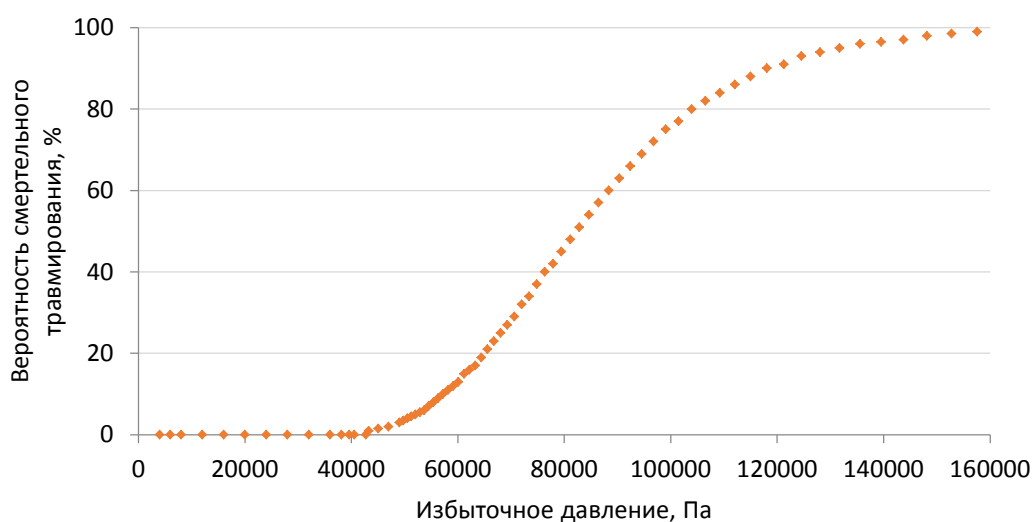


Рисунок 2.18 – Значения вероятности смертельного травмирования человека при барическом воздействии ударной волны

Использование выражений (2.23-2.39) позволяет производить вероятностную оценку травмирования персонала при взрывах метана и пыли с учетом прогнозных параметров МВС и ПВС, интенсивности проветривания и топологии выработок. Результаты вероятностной оценки делают возможным осуществление прогноза возникновения опасных зон динамического воздействия воздушных ударных волн при комплексной оценке профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли. Стоит учесть, что согласно результатам анализа зарегистрированных в 2005-2016 гг. ГНС по причинам

взрывов метана и пыли, преобладающее число инцидентов произошло в условиях подачи расчетного количества воздуха для проветривания выработок, а основными предпосылками возникновения взрывоопасных МВС явились:

- некорректное определение метанообильности выработок, проведенное без должного учета всех возможных факторов, влияющих на интенсивность метановыделения, и как следствие – некорректное определение расчетного расхода воздуха;

- создание условий для формирования локальных местных и слоевых скоплений метана, связанных с образованием местных сопротивлений и застойных слабопроветриваемых зон.

Поскольку в настоящий момент значительная часть организационных и субъективных факторов являются недоступными для количественного анализа, при разработке модели нечеткого логического вывода для комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли следует использовать полуколичественные методы анализа, основанные на экспертных оценках.

2.5 Выводы по второй главе

1. В ходе анализа актов технического расследования причин аварий, произошедших на угольных шахтах России в 2005-2016 гг. в результате взрывов, вспышек и воспламенений метана и пыли, установлено, что на долю взрывов метана с участием угольной пыли приходится 77 % человеческих жертв, на долю взрывов метана – 19 %. Всего в ходе анализа установлены 57 коренных причин взрывов метана и пыли, основной вклад среди которых связан с влиянием организационных и субъективных факторов.

2. На уровне значимости $\alpha = 0,05$ при проведении ретроспективного анализа данных установлены статистически-значимые связи между: частотой возникновения взрывов метана и относительной газообильностью шахты, склонностью пластов к самовозгоранию, системой разработки; наблюдаемым индивидуальным риском смертельного травмирования персонала при взрывах

метана и частотой возникновения взрывов. Полученные результаты использованы при проведении многофакторного регрессионного анализа, с получением модели прогноза индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана, позволяющей осуществлять ранжирование и выявление угольных шахт, производственная среда которых характеризуется высоким значением профессионального риска.

3. Установлены связи основных горно-геологических и горнотехнических факторов с интенсивностью выделения метана в очистные и подготовительные забои из различных источников. На основе выявленных связей установлена процедура прогноза метановыделения в выработки для осуществления вероятностной оценки поражающего воздействия взрывов на персонал, а также комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли.

4. Выполнен анализ факторов, влияющих на размер зоны поражения при взрывах метана и пыли, в ходе которого установлены количественные зависимости, позволяющие осуществлять вероятностную оценку поражения персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли с учетом параметров МВС и ПВС, интенсивности проветривания и топологии выработок.

5. На основании полученных данных установлен комплекс факторов, влияющих на профессиональный риск травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли. Обозначена область применения экспертной оценки для учета влияния организационных и субъективных факторов, недоступных для количественного анализа.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНА И ПЫЛИ

3.1 Логико-графический анализ профессионального риска

Задача анализа возможных сценариев и причин, приводящих к травмированию персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли, может быть решена при создании модели нечеткого логического вывода (МНЛВ) на основе иерархической структуры, отражающей причинно-следственные связи между учтенными факторами с использованием базы продукционных правил нечеткого логического вывода (НЛВ). Графическое изображение таких структур отражает диалектический характер причинно-следственных связей и наиболее широко используется в логико-графических методах анализа дерева событий – ЕТА, дерева отказов – FTA и «галстук-бабочка» – ВТА. Подобные сценарные диаграммы позволяют схематизировать возможные сценарии развития аварийной ситуации [65]. Кроме того, преимущества иерархических баз знаний МНЛВ заключается в возможности адекватного описания многомерных зависимостей «вход-выход» с помощью минимального количества продукционных правил НЛВ [120].

Использование указанного подхода позволяет учитывать различные источники возникновения опасностей и характеризовать их набором факторов, являющихся элементами системы более низкого иерархического уровня. Представление последовательности событий в виде иерархической структуры ВТА в МНЛВ позволяет отобразить предпосылки возникновения различных событий и учитывать их совместное влияние на возможность реализации головного события. Таким образом, становится возможным проведение оценки и прогноза численных показателей профессионального риска с осуществлением анализа возможных сценариев и причин реализации неблагоприятных событий, что обладает высокой значимостью при анализе рисков и определении мероприятий по их управлению.

Метод ВТА позволяет воспроизводить в иерархической структуре МНЛВ защитные барьеры в цепочках «причины → опасное событие» и «опасное событие → последствие» [27] и учитывать факторы защиты, направленные на предупреждение или смягчение возможных неблагоприятных последствий. Это позволяет дифференцировать риски возникновения конкретных событий с учетом влияния факторов защиты на показатели риска и отображать степень достаточности мероприятий по их минимизации. В работе [8] приведено рассмотрение совокупности мер, направленных на снижение риска аварий на угольных шахтах и профессиональных рисков, в виде многоступенчатой системы средств обеспечения безопасности. В соответствии с этим, при анализе риска поражения персонала при взрывах метана и пыли следует выделять:

1. Внешние средства снижения риска (I уровень) – направлены на снижение вероятности реализации условий, необходимых для возникновения взрывов метана и пыли.

2. Системы, связанные с безопасностью (II уровень) – используются в предаварийных и аварийных ситуациях, направлены на снижение вероятности возникновения взрывов метана и пыли, которая обусловлена недостаточностью мероприятий, реализованных на I уровне.

3. Другие технологии (III уровень) – направлены на предотвращение распространения поражающих факторов взрывов метана и пыли и снижение профессионального риска поражения персонала при взрывах метана и пыли.

Для определения источников опасностей и условий поражения персонала при взрывах метана и пыли были использованы результаты анализа профессионального риска, представленные в Главе 2. Определение факторов риска и факторов защиты производилось на уровне детализации, достаточном для учета в МНЛВ выявленных в ходе анализа опасных ситуаций и условий. При этом в комплексе факторов риска и факторов защиты следует выделять:

1. Горно-геологические факторы – факторы, характеризующиеся горно-геологическими условиями угольного месторождения, особенностями строения и морфологии угольных залежей, их пространственного положения, физико-

химическими и газифизическими свойствами горных пород и их минеральным составом [24, 70].

2. Горнотехнические факторы – факторы, определяемые технологией ведения горных работ, совокупностью компонентов геологической среды, используемых технологических решений и технических средств.

3. Организационные факторы – факторы, определяемые установленным порядком проведения работ, организацией рабочего процесса и деятельностью по обеспечению промышленной безопасности и безопасности труда.

4. Субъективные факторы – факторы, определяемые социально-демографическими, социально-психологическими и социологическими характеристиками участников производственного процесса [2].

Перечень показателей входных переменных, установленный в ходе логико-графического анализа профессионального риска по методу ВТА и соответствующий выявленному комплексу факторов, представлен в Таблице 3.1. Показатели внутренних и выходных переменных иерархической структуры МНЛВ представлены в Таблице 3.2. При этом для описания защитных барьеров, направленных на минимизацию влияния факторов риска, были использованы показатели фактического уровня соответствия защитных мероприятий установленным требованиям промышленной безопасности (ПБ), регламентированной действующей нормативной документацией. Это позволяет упростить дальнейшее проведение экспертной оценки и сократить количество продукционных правил в базе продукционных правил МНЛВ.

Таблица 3.1 – Показатели факторов, используемых в иерархической структуре МНЛВ в качестве входных переменных

№	Показатель фактора	Шифр на схеме
<i>Горно-геологические факторы</i>		
1	Природная метаносность разрабатываемого пласта	ГГ-1
2	Природная метаносность вмещающих пород	ГГ-2
3	Природная метаносность пласта-спутника	ГГ-3
4	Расстояние до пласта-спутника	ГГ-4

Продолжение таблицы 3.1

№	Показатель фактора	Шифр на схеме
5	Мощность пласта-спутника	ГГ-5
6	Мощность угольных пачек	ГГ-6
7	Опасность пласта по суфлярным выделениям	ГГ-7
8	Опасность пласта по внезапным выбросам угля (породы) и газа	ГГ-8
9	Опасность пласта по взрывчатости угольной пыли	ГГ-9
10	Склонность пласта к самовозгоранию	ГГ-10
11	Степень фрикционной опасности горных пород	ГГ-11
<i>Горнотехнические факторы</i>		
12	Суточная производительность очистного забоя	T-2
13	Длина очистного забоя	T-3
14	Скорость подвигания очистного забоя	T-4
15	Время транспортирования угля в лаве	T-5
16	Скорость подвигания подготовительного забоя	T-7
17	Способ проходки подготовительного забоя	T-8
18	Схема проветривания выемочного участка	T-10
19	Уровень интенсивности выделения пыли в воздух выработки	T-12
20	Наличие электрооборудования под напряжением	T-13
21	Периметр поперечного сечения выработки	T-15
22	Длина выработки (участка выработки)	T-16
23	Площадь поперечного сечения выработки	T-18
24	Коэффициент аэродинамического сопротивления выработки	T-19
25	Уровень пылевзрывоопасности выработки	T-20
<i>Организационные и субъективные факторы</i>		
26	Уровень соблюдения требований, установленных проектной и технической документацией в части технических решений по вентиляции выработок	O-1
27	Уровень соответствия проектной и технической документации в части технических решений по вентиляции выработок установленным требованиям, нормам и правилам ПБ	O-2
28	Уровень плотности присутствия персонала в выработке	O-11
29	Уровень трудовой дисциплины на предприятии	C-1
<i>Факторы защиты (I уровень)</i>		
30	Степень дегазации разрабатываемого пласта	T-1
31	Степень дегазации пласта-спутника	T-6
32	Уровень обеспеченности выработки воздухом	T-9
33	Осуществление мероприятий по предупреждению и борьбе с суфлярными выделениями	T-11
34	Уровень соответствия применяемого электрооборудования требованиям, установленным эксплуатационной документацией шахты и завода-изготовителя	T-14
35	Осуществление мероприятий по обеспыливанию воздуха	T-17

Продолжение таблицы 3.1

№	Показатель фактора	Шифр на схеме
36	Уровень соблюдения установленных требований к применению мер для безопасной разработки выбросоопасных и угрожаемых угольных пластов	O-3
37	Уровень соблюдения установленных требований к осуществлению мероприятий по обеспыливанию воздуха	O-4
38	Уровень соблюдения установленных требований к организации и осуществлению производственного контроля за соблюдением требований ПБ	O-5
39	Уровень соблюдения установленных требований к реализации мер по предупреждению эндогенных пожаров	O-7
40	Уровень соблюдения установленных требований к контролю самонагревания угля и эндогенной пожароопасности	O-8
41	Уровень соблюдения установленных требований к осмотрам и ревизии рудничного взрывобезопасного электрооборудования	O-9
42	Уровень соблюдения установленных требований к применению систем взрывозащитного орошения выемочных и проходческих технических устройств	O-10
43	Уровень соблюдения установленных требований к осуществлению мероприятий по предупреждению взрывов угольной пыли	O-12
<i>Фактор защиты (II уровень)</i>		
44	Уровень соблюдения установленных требований к системе АГК	O-6
<i>Фактор защиты (III уровень)</i>		
45	Уровень соблюдения установленных требований к реализации мероприятий по локализации взрывов угольной пыли	O-13

Таблица 3.2 – Показатели факторов, используемых в иерархической структуре МНЛВ в качестве внутренних и выходных переменных

№	Показатель фактора	Шифр на схеме
1	Риск смертельного поражения персонала при взрыве МВС/ПВС/МПВС	P1
2	Риск смертельного поражения персонала при вторичном взрыве ПВС	P2
3	Риск первичного взрыва МВС/ПВС/МПВС	P3
4	Риск присутствия персонала в зоне поражения первичного взрыва	P4
5	Размер зоны смертельного поражения персонала ударной волной	P4-1
6	Уровень плотности присутствия персонала в выработке	P4-2
7	Начальное значение избыточного давления на фронте ударной волны	P4-3
8	Масса метана в смеси	P4-4
9	Масса пыли в смеси	P4-5
10	Риск вторичного взрыва ПВС	P-5
11	Риск образования взрывоопасной ПВС при переходе отложившейся пыли во взвешенное состояние	P5-1

Продолжение таблицы 3.2

№	Показатель фактора	Шифр на схеме
12	Уровень организации и выполнения мероприятий по предупреждению взрывов угольной пыли	P5-2
13	Уровень организации и выполнения мероприятий по локализации взрывов угольной пыли	P5-3
14	Риск присутствия персонала в зоне поражения вторичного взрыва	P6
15	Риск возникновения взрывоопасной МВС/ПВС/МПВС	P7
16	Риск возникновения взрывоопасной МВС	P7-1
17	Риск возникновения взрывоопасной ПВС	P7-2
18	Риск возникновения взрывоопасной МВС в результате метановыделения	P7-3
19	Риск возникновения взрывоопасной МВС в результате суфлярного выделения метана	P7-4
20	Риск возникновения взрывоопасной МВС в результате внезапного выброса метана	P7-5
21	Уровень интенсивности метановыделения в выработке	P7-6
22	Уровень организации и выполнения мероприятий по вентиляции выработок	P7-7
23	Уровень организации мероприятий по обеспыливанию воздуха	P7-8
24	Метановыделение в очистном забое	P7-9
25	Метановыделение в подготовительном забое	P7-10
26	Метановыделение из разрабатываемого пласта	P7-11
27	Метановыделение из отбитого угля в очистном забое	P7-12
28	Метановыделение из выработанного пространства	P7-13
29	Метановыделение из неподвижных обнаженных поверхностей пласта	P7-14
30	Метановыделение из отбитого угля в подготовительном	P7-15
31	Риск образования зон с недостаточным проветриванием	P7-16
32	Уровень соответствия принятых технических решений по вентиляции выработок установленным требованиям, нормам и правилам ПБ	P7-17
33	Уровень интенсивности выделения взрывоопасной пыли в воздух выработки	P7-18
34	Риск возникновения высокотемпературного источника инициирования	P8
35	Риск возникновения очага самовозгорания угля	P8-1
36	Риск возникновения электрического искрового/дугового разряда	P8-2
37	Риск образования высокотемпературного импульса в результате фрикционного искрения горных пород при контакте с резцами	P8-3
38	Риск образования высокотемпературного импульса в результате нарушения установленных требований к ведению огневых работ и пользованию открытым огнем	P8-4
39	Уровень организации и выполнения мероприятий по предупреждению эндогенных пожаров	P8-5
40	Уровень организации и выполнения мероприятий по обеспечению взрывобезопасности электрооборудования	P8-6

Продолжение таблицы 3.2

№	Показатель фактора	Шифр на схеме
41	Уровень организации и выполнения мероприятий по предупреждению фрикционного искрения горных пород при контакте с резцами	P8-7
42	Уровень соблюдения установленных требований к выполнению мероприятий по предупреждению эндогенных пожаров	P8-8
43	Уровень соблюдения установленных требований к применению электрооборудования во взрывоопасных средах	P8-9
44	Уровень соблюдения установленных требований к эксплуатации системы АГК	РА
45	Риск систематических нарушений персоналом установленных требований ПБ	РД

С учетом выбранных подходов к формированию иерархической структуры базы производственных правил МНЛВ и выявленного комплекса факторов был проведен качественный анализ профессионального риска по методу ВТА с получением графической иерархической схемы, представленной на Рисунке 3.1 и описывающей следующие уровни иерархии: «факторы причин → причины → условия → событие → последствия события ← факторы последствий события». При создании модели учитывался имплицитный характер межфакторных связей, адаптированный для дальнейшей экспертной оценки. Полученная графическая иерархическая схема позволяет производить анализ сценариев, приводящих к травмированию персонала при взрывах метана и пыли, путем определения численных показателей в узлах с использованием соответствующих производственных правил НЛВ.

3.2 Обоснование модели нечеткого логического вывода

Как показано в Главе 1 и Главе 2, комплексная оценка профессионального риска поражения персонала при взрывах метана и пыли в подземных выработках угольных шахт проводится в условиях отсутствия необходимого объема статистической информации. Подобная информационная неопределенность обусловлена одновременным воздействием на производственную среду комплекса разнородных факторов, не подлежащих совокупной количественной оценке в нестационарных условиях существования геотехнологической системы. Это приводит к сложности формализации влияния ряда выявленных факторов и накладывает ограничения на реализацию традиционных стохастических методов оценки и прогноза риска. Кроме того, основные задачи комплексной оценки рисков не могут решаться с помощью формальных математических методов, поскольку высокая сложность системы несовместима с высокой точностью ее описания (принцип несовместимости Л. Заде) [149]. Согласно общепринятой практике, в подобных условиях информационная полнота процедуры оценки и прогноза риска достигается при использовании полуколичественных методов анализа, основанных на результатах экспертной оценки.

Преимущества экспертной оценки заключаются в возможности анализа влияния факторов с использованием субъективных суждений квалифицированных экспертов, базирующихся на их опыте и знаниях. Это позволяет минимизировать степень информационной неопределенности процедуры оценки и прогноза риска и включать в такую оценку факторы, влияние которых не может быть формализовано в настоящих условиях информационной неопределенности исходных данных. Высокий уровень субъективности таких оценок подразумевает переход к качественному определению характеристик анализируемых ситуаций с использованием лингвистических значений, которые являются менее точными и менее информативными, чем численные. Это делает необходимым привлечение группы экспертов и дальнейшую обработку результатов с целью получения согласованных мнений и минимизации степени субъективности результатов оценки и прогноза [138].

При проведении комплексной оценки и прогноза риска поражения персонала при взрывах метана и пыли следует использовать модели, позволяющие совместно использовать результаты стохастического анализа, экспертных оценок и математического моделирования. При этом возникает необходимость использования математического аппарата, позволяющего проводить операции над разнородными исходными данными с формализацией качественных оценок и получением численных показателей профессионального риска. В международной практике оценки, прогноза и управления рисками в условиях многофакторности и неопределенности широко используются модели, основанные на аппарате нечеткой логики, поскольку они позволяют получать наиболее обоснованные выводы и признаются наиболее эффективными в условиях нечеткости исходных данных [65, 120].

Базовым понятием в нечеткой логике является понятие нечеткого множества. Нечеткое множество A – это множество значений универсального множества U , характеризуемое функцией принадлежности $\mu_A: U \in [0;1]$, которая ставит в соответствие каждому элементу $u \in U$ число $\mu_A(u)$ из интервала $[0;1]$, характеризующее степень принадлежности элемента u подмножеству A [36]. Нечеткое множество может быть рассмотрено как совокупная характеристика различных подклассов элементов универсального множества, что позволяет представлять его как нечеткое ограничение некоторой лингвистической переменной, выраженной в естественном языке. Использование подобного аппарата дает возможность приближенно описывать явления, которые не поддаются описанию в общепринятых количественных терминах и формализовать результаты качественной оценки факторов риска и факторов защиты. При этом нечеткая переменная (терм), основанная на нечетком множестве, характеризуется функцией принадлежности μ_A , которая отражает субъективную меру соответствия элемента $u \in U$ данной нечеткой переменной в представлении эксперта, проводящего оценку. Таким образом, использование нечетких множеств позволяет моделировать неопределенность в оценках экспертов, учитывать ее в структуре нечеткого числа и повышать тем самым

достоверность таких оценок [138]. Совокупность термов образует переменную более высокого порядка – лингвистическую переменную (ЛП), которая характеризуется набором Ω [36]:

$$\Omega = (X, T(X), U, G, M), \quad (3.1)$$

где: X – название переменной; $T(X)$ – терм-множество переменной X , т.е. множество названий лингвистических значений переменной X ; U – универсальное множество, на котором определяется $T(X)$; G – синтаксическое правило, порождающее названия x значений переменной X ; M – семантическое правило, которое ставит в соответствие каждой нечеткой переменной x ее смысл $M(x)$. В качестве универсального носителя лингвистических переменных в модели оценки риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли может быть использован 01-носитель – отрезок вещественной оси $[0;1]$, к которому могут быть сведены любые конечномерные отрезки путем простого линейного преобразования [138]. В частности, 01-носитель может быть использован при формализации качественных экспертных оценок с заданием соответствующих лингвистических переменных. Согласно общепринятой практике [19, 138 и др.], для описания результатов экспертных оценок используются нечеткие переменные с трапециевидными и треугольными функциями принадлежности.

Наибольшей достоверностью обладают стандартные нечеткие 01-классификаторы (Рисунок 3.2), в которых точкой перехода между нечеткими переменными являются элементы подмножества $u \in U$ с $\mu_A(u) = 0,5$, а сумма функций принадлежности для любого u равна единице [36, 138].

Способом обработки знаний в подобных экспертных системах является логический вывод по нечетким продукциям (НЛВ). Описание анализируемых факторов в виде лингвистических переменных и использование аппарата нечеткой логики позволяет моделировать их взаимодействие в сложной динамической системе.

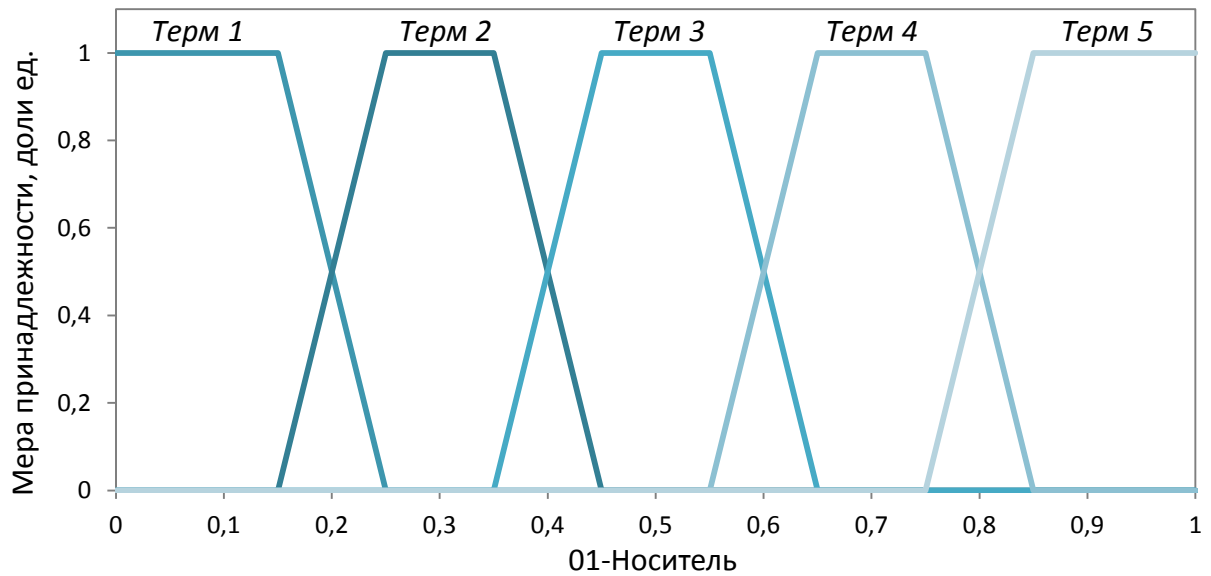


Рисунок 3.2 – Стандартный пятиуровневый нечеткий 01-классификатор

Для этого необходимо определить функции принадлежности входных переменных в ходе экспертной оценки и сформировать продукционные правила НЛВ следующего вида:

$$\text{ЕСЛИ } \langle ЛП1 = НП1 \rangle \text{ И } \langle ЛП2 = НП2 \rangle \text{ ТО } \langle ЛП3 = НП3 \rangle (W1), \quad (3.2)$$

где: $ЛП1$, $ЛП2$ – antecedentes лингвистические переменные; $ЛП3$ – consequent лингвистическая переменная; $НП1$, $НП2$, $НП3$ – нечеткие переменные, соответствующие $ЛП1$, $ЛП2$ и $ЛП3$; $W1$ – весовой коэффициент, означающий степень уверенности в истинности получаемого подзаключения. Совокупность продукционных правил составляет базу знаний МНЛВ, которая объединяет имеющуюся эмпирическую и эвристическую информацию и разбивает пространство влияющих факторов на подобласти, заданные соответствующими нечеткими переменными [87].

В качестве алгоритма нечеткого вывода в МНЛВ предпочтительно использование алгоритма Мамдани, поскольку параметры алгоритма наиболее удобны для содержательной интерпретацией экспертами [59]. Процедура НЛВ в этом случае разделяется на этапы, представленные в Таблице 3.3 и на Рисунке 3.3. Приведенные методы реализации этапов алгоритма определены исходя из

специфики поставленных задач оценки и прогноза численных показателей профессионального риска поражения персонала при взрывах метана и пыли.

Таблица 3.3 – Этапы алгоритма нечеткого вывода Мамдани [95, 119, 120]

Этап алгоритма	Метод	Цель
Фаззификация данных (введение нечеткости)	Сопоставление	Определение значения функции принадлежности i -го термина T_i входной нечеткой лингвистической переменной $\mu_{Ti}(x)$, где x – четкое численное значение входной переменной, определенное на носителе antecedentного нечеткого множества X ($x \in X$)
Агрегирование подусловий	Логическая конъюнкция	Определение степени истинности antecedenta правила $\mu_A = \min\{\mu_{Ti}(x); \mu_{Ti+1}(x)\}$
Активизация подзаключений	Min-активизация	Определение функции принадлежности k -го термина T_k консеквента правила $\mu_{Tk}(y) = \{w; \mu_{Tk}(y) \leq \mu_A\}$, где y – элемент консеквентного нечеткого множества, определенный на носителе Y ($y \in Y$), w – весовой коэффициент правила
Аккумуляция подзакключений	Max-объединение	Определение объединенной функции принадлежности консеквентной лингвистической переменной $\mu_K(y) = \max\{\mu_{Tk}(y); \mu_{Tk+1}(y)\}$
Дефаззификация (приведение к четкости)	Метод центра тяжести	Определение четкого числового значения консеквентной лингвистической переменной $y^* = \frac{\int_{\underline{y}}^{\bar{y}} y \cdot \mu_K(y) dy}{\int_{\underline{y}}^{\bar{y}} \mu_K(y) dy}$, где y^* – центроид площади фигуры, ограниченной функцией $\mu_K(y)$

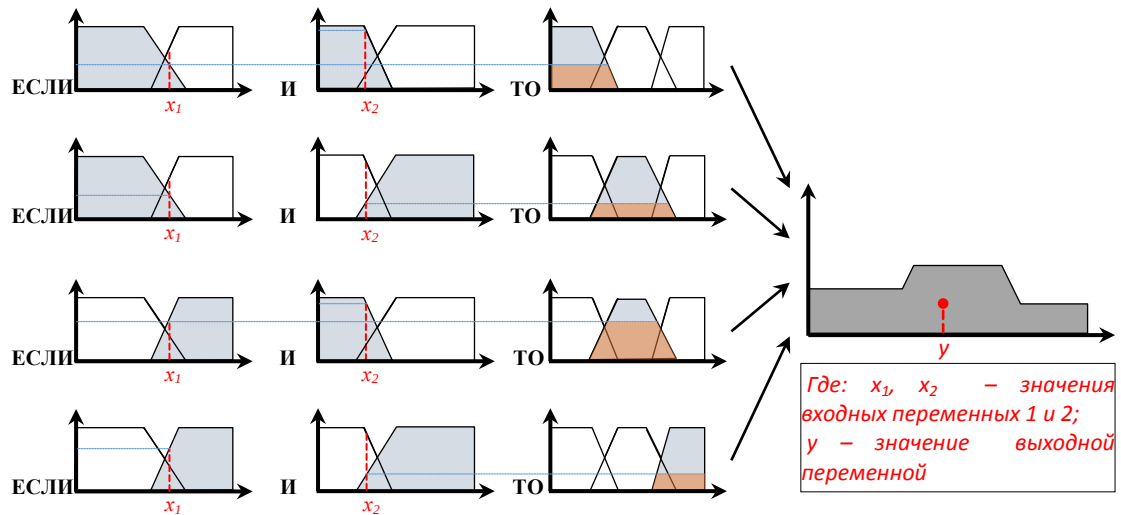


Рисунок 3.3 – Реализация алгоритма Мамдани по продукционным правилам НЛВ

Алгоритм обработки данных в модели нечеткого вывода соответствует схеме, представленной на Рисунке 3.4.

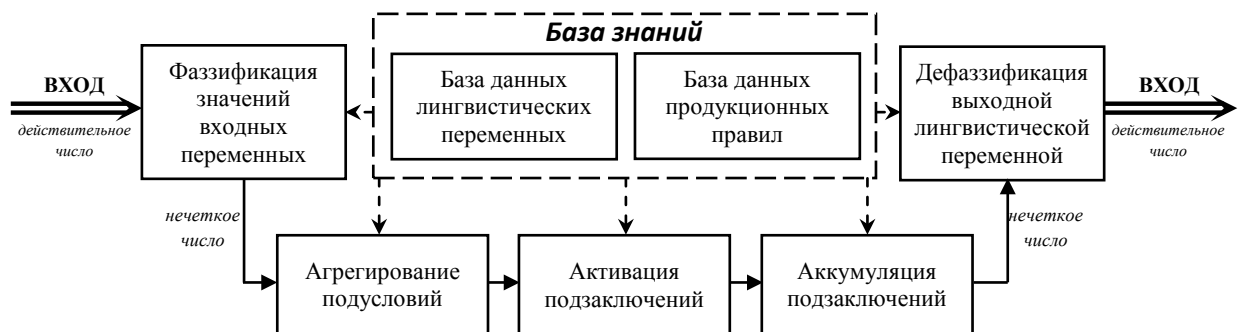


Рисунок 3.4 – Система обработки данных на основе НЛВ

Любая математическая связь может быть аппроксимирована с заданной точностью набором продукционных правил НЛВ [120], что позволяет использовать в МНЛВ выявленные и формализованные структурные связи. Кроме того, формализация экспертных оценок с помощью нечетких чисел делает возможным учет результатов качественного анализа [32]. В соответствии с этим, для совместного использования в базе знаний МНЛВ результатов количественного анализа и экспертной оценки профессионального риска, разработан алгоритм составления базы знаний МНЛВ, представленный на

Рисунке 3.5. При этом формируемая база знаний соответствует разработанной графической иерархической схеме (Рисунок 3.1), что позволяет воспроизводить причинно-следственные связи в МНЛВ и представлять их в виде, позволяющем осуществить экспертную оценку.

Таким образом показано, что аппарат нечеткого вывода позволяет рассчитывать численные показатели профессионального риска, полученные при совместном учете разнородных результатов статистического анализа, математического моделирования и экспертной оценки. При этом достигается практический результат, выраженный в возможности использования МНЛВ в существующих условиях информационной неопределенности исходных данных о показателях состояния нестационарной геотехнической системы. Для дальнейшей реализации МНЛВ необходимо формирование базы знаний квалифицированными экспертами в соответствии с разработанным алгоритмом.

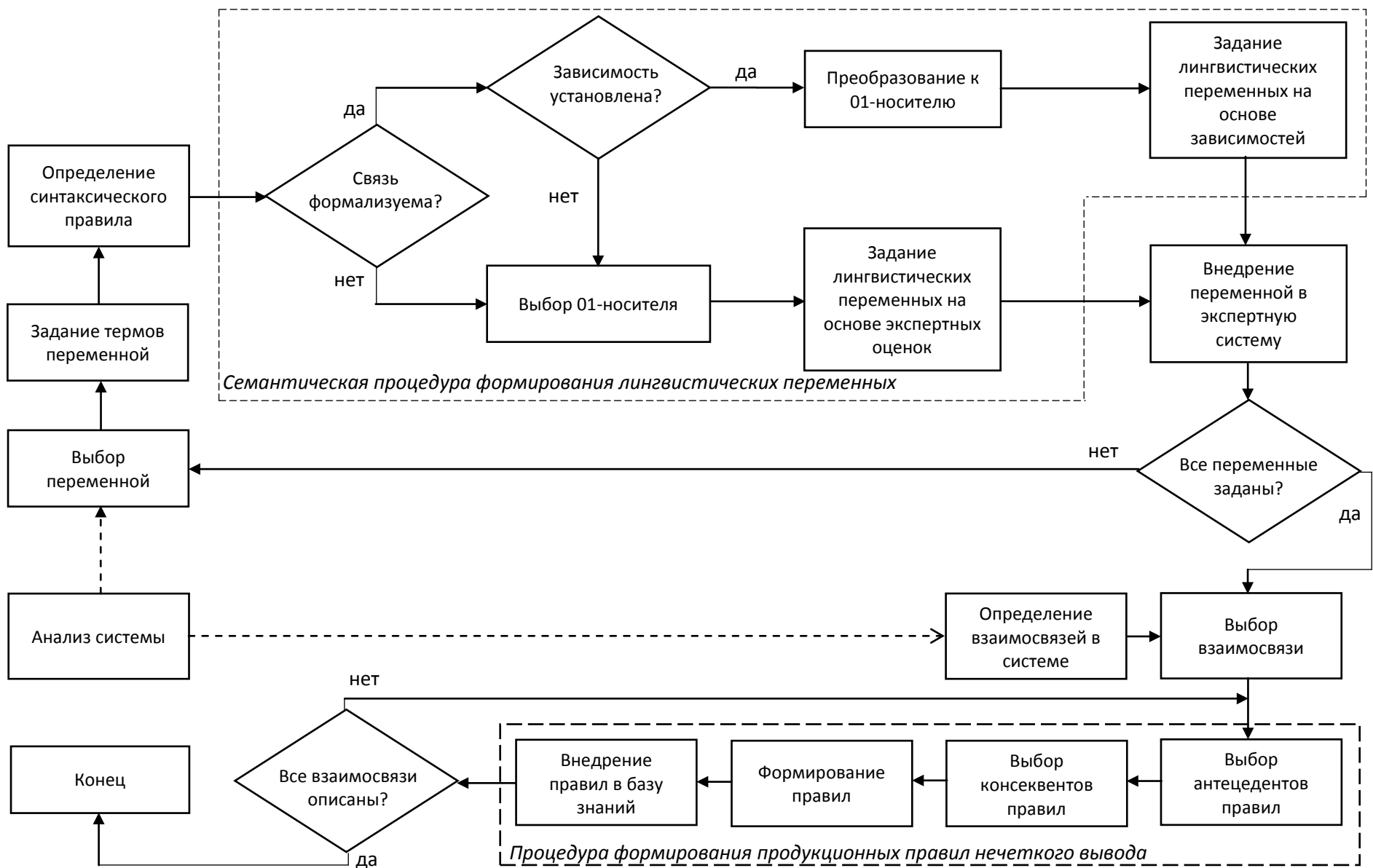


Рисунок 3.5 – Алгоритм формирования базы знаний МНЛВ

3.3 Экспертная оценка факторов

В соответствии с [27], использование экспертных оценок является предпочтительным в случаях невозможности проведения полного количественного анализа ввиду отсутствия достаточного объема информации об анализируемой системе. При этом математический аппарат НЛВ позволяет осуществить полуколичественный анализ риска путем формализации результатов экспертных оценок и представления выходных данных в виде численных значений. В соответствии с разработанным алгоритмом формирования базы правил МНЛВ (Рисунок 3.5), основными задачами экспертной оценки являются:

- проведение непосредственной экспертной оценки сложноформализуемых связей;
- реализация семантической процедуры формирования лингвистических переменных;
- реализация процедуры формирования продукционных правил нечеткого вывода.

Поскольку база продукционных правил НЛВ составляется на основе разработанной графической иерархической схемы, каждый ее элемент представляется в виде лингвистической переменной [65]. Число термов лингвистических переменных определено таким образом, чтобы с одной стороны минимизировать возможные затруднения экспертов при формировании предпочтений в выборе термина, с другой стороны – обеспечить возможность реализации предпочтений экспертов на достаточном для дальнейшего использования уровне детализации [100]. Термы лингвистических переменных определены в соответствии с общепринятой специфической классификацией, а при ее отсутствии – в виде универсальных сравнительных степеней $Y = \{\text{Низкий, Средний, Высокий}\}$ или в номинальном виде. При этом формулировки лингвистических переменных и термов выражены в виде, удобном для восприятия экспертами. В частности, сформулировано обобщенное определение термина «Риск», поскольку в разработанной графической иерархической схеме

лингвистическая переменная «Уровень риска» используется для описания негативных событий различного рода:

1. Риск поражения персонала при взрыве МВС/ПВС/МПВС – относится к категории профессионального риска, т.е. вероятности причинения вреда здоровью работника в результате воздействия опасных производственных факторов при исполнении работником обязанностей по трудовому договору [109].

2. Риск взрыва МВС/ПВС/МПВС – относится к категории риска аварий, т.е. меры опасности, характеризующей возможность возникновения аварии на ОПО и соответствующей ей тяжести последствий [62].

3. Риск возникновения неблагоприятного события – вероятность возникновения специфического условия, необходимого для причинения вреда здоровью работника в результате воздействия поражающих факторов взрыва МВС/ПВС/МПВС [27].

Поскольку указанные показатели риска характеризуют неблагоприятные события, а тяжесть последствий предопределена структурой модели (смертельное травмирование при взрыве метана и пыли), то в общем смысле под термином «Риск» следует понимать меру опасности, характеризующую возможность возникновения рассматриваемого неблагоприятного события.

Учитывая имеющийся опыт экспертной оценки рисков [11, 104 и др.], для определения уровня риска R была выбрана условная линейная шкала, построенная на отрезке $0 \leq R \leq 1$ (01-носителе). При этом уровню $R = 0$ соответствует наименьшая возможность возникновения неблагоприятного события (событие невозможно), а уровню $R = 1$ – наибольшая возможность (событие неизбежно). В соответствии с классификацией степени риска, используемой в [89], на 01-носителе строится лингвистическая переменная, состоящая из четырех термов $R = \{\text{Низкий, Средний, Высокий, Очень высокий}\}$, семантические свойства которых могут быть определены в соответствии с уровнями допустимости риска, приведенными в Разделе 1.2. При отображении в виде лингвистической переменной R , риск рассматривается как общее свойство элементов 01-носителя u_{01} , а мера принадлежности $\mu_A(u_{01})$ воспроизводит принадлежность элементов

$u_i \in u_{01}$ терму A лингвистической переменной R , отображающему степень проявления этого свойства у рассматриваемого неблагоприятного события.

Поскольку задачей экспертной оценки является определение значимости отдельных факторов, то в данном случае применяется метод непосредственной экспертной оценки с использованием точечных или интервальных оценок. При этом для количественного описания факторов используются реальные, физические или технические параметры [65], а при их отсутствии – условные показатели, определенные на универсальном 01-носителе.

Требования к привлеченным в рамках настоящего исследования экспертам сформированы на основе положений Нормативных документов [76, 86]. Так, экспертом в области промышленной безопасности и охраны труда может быть признано физическое лицо, обладающее специальными познаниями в области промышленной безопасности и охраны труда и соответствующее установленным требованиям:

- наличие высшего образования;
- наличие стажа работы не менее 5 лет по специальности, соответствующей области специальных знаний и навыков;
- наличие знаний нормативных правовых актов Российской Федерации в области промышленной безопасности и охраны труда;
- наличие не менее 5 публикаций в области промышленной безопасности и охраны труда.

К процедуре экспертной оценки в целях настоящего исследования привлечены 10 экспертов, уровень квалификации которых соответствует указанным требованиям. В группу экспертов вошли специалисты:

- отраслевых университетов;
- ФГУП «ВГСЧ»;
- угледобывающих компаний;
- профильных научно-экспертных центров.

При оценке сложноформализуемых связей и реализации семантической процедуры формирования лингвистических переменных использован метод

статистической обработки мнений группы экспертов, приведенный в [120], согласно которому в ходе оценивания экспертом определяются функции принадлежности $\mu_{lj}(u_i)$ элементов универсального множества $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ к элементам множества термов $L=\{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ для всех $l=\overline{1, m}$ и $i=\overline{1, n}$ (где m – число термов терм-множества L , n – число членов универсального множества U). Результатом оценки является формирование нечеткого множества $\tilde{l}_j$ для определения лингвистического термина l_j на универсальном множестве U :

$$\tilde{l}_j = \left(\frac{\mu_{lj}(u_1)}{u_1}, \frac{\mu_{lj}(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{\mu_{lj}(u_n)}{u_n} \right), j = \overline{1, m}. \quad (3.3)$$

Получение оценок экспертов произведено в процессе анкетирования, в ходе которого каждый эксперт указал свое мнение о степени соответствия рассматриваемого свойства нечеткого множества $\tilde{l}_j (j=\overline{1, m})$ для каждого элемента $u_i (i=\overline{1, n})$ в виде оценки $b_{j,i} \in [0;1]$.

Для снижения степени субъективности экспертной оценки произведено обобщение результатов анкетирования группы экспертов с предварительным расчетом коэффициента вариации и дальнейшим расчетом усредненных степеней принадлежности оцениваемого нечеткого множества (терма) $\tilde{l}_j$:

$$\mu_{lj}(u_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1, K} b_{j,i}^k, i = \overline{1, n}, \quad (3.4)$$

где: K – количество экспертов, чел; $b_{j,i}^k$ – мнение k -го эксперта о наличии у элемента u_i свойств нечеткого множества $\tilde{l}_j$. Использование оценок группы экспертов в процедуре формирования продукционных правил НЛВ заключалось в определении консеквентов правил. При обработке результатов групповой оценки произведен расчет весовых коэффициентов $w_g (g=\overline{1, p})$ для p термов консеквентной лингвистической переменной:

$$w_g = \frac{K_g}{K}, \quad (3.5)$$

где: K_g – число экспертов, определивших g -ый терм в качестве консеквента правила. Полученные результаты экспертного оценивания позволили сформировать базу знаний, необходимую для реализации модели комплексной оценки и прогноза численных показателей профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли. Характеристики полученной базы знаний МНЛВ представлены в Таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристика базы продукционных правил НЛВ

Тип переменных	Параметры базы продукционных правил НЛВ	
	Количество переменных	Количество продукционных правил НЛВ
Входные переменные	45	100
Внутренние переменные	43	810
Выходные переменные	2	60
Всего	90	970

Поскольку продукционные правила НЛВ позволяют задавать любые непрерывные функции с любой заданной точностью и использовать формализованные экспертные оценки в виде лингвистических переменных, достоинством использования МНЛВ является возможность объединения различных подходов к анализу факторов профессионального риска в едином комплексном решении. Так, при создании базы знаний МНЛВ использована иерархическая структура, воспроизводящая причинно-следственные связи в соответствии с разработанной графической иерархической схемой и объединяющая результаты количественного анализа риска, приведенные в Разделе 2.2, анализа математических моделей, приведенные в Разделах 2.3, 2.4 и результаты экспертной оценки сложноформализуемых организационных и субъективных факторов. Полученная база знаний позволяет произвести реализацию МНЛВ с возможностью дополнения базы лингвистическими переменными и продукционными правилами НЛВ с целью актуализации и совершенствования модели.

3.4 Анализ результатов нечеткого моделирования

На основе сформированной базы знаний МНЛВ произведена реализация процедур НЛВ с использованием пакета прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox среды математического моделирования MATLAB [40]. В результате получена модель МНЛВ, позволяющая производить комплексную оценку и прогноз профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли в подземных горных выработках угольных шахт. Для описания показателей МНЛВ использованы нечеткие множества с трапециевидными и треугольными функциями принадлежности, построенные на основе анализа обобщенных оценок экспертов (Таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Используемые в МНЛВ функции принадлежности [120]

Вид функции	Аналитическое выражение	Интерпретация параметров
Трапециевидная	$\mu(u) = \begin{cases} 0, & u \leq a, u \geq d \\ \frac{u-a}{b-a}, & a \leq u \leq b \\ 1, & b \leq u \leq c \\ \frac{d-u}{d-c}, & c \leq u \leq d \end{cases}$	(a,d) – носитель нечеткого множества; $[b,c]$ – ядро нечеткого множества
Треугольная	$\mu(u) = \begin{cases} 0, & u \leq a, u \geq c \\ \frac{u-a}{b-a}, & a < u \leq b \\ \frac{c-u}{c-b}, & b < u < c \end{cases}$	(a,c) – носитель нечеткого множества; b – координата максимума

Отличительной особенностью разработанной модели является возможность получения численных показателей переменных, находящихся в узлах разработанной иерархической структуры и позволяющих производить сравнительный анализ возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий. Указанное преимущество достигается за счет итеративного обращения к системе НЛВ (Рисунок 3.6), производящей реализацию алгоритма НЛВ Мамдани в иерархической структуре по принципу «вход-выход»: результаты НЛВ переменных нижнего уровня иерархии в четкой

числовой форме подаются на вход переменной верхнего уровня в соответствии со способом, указанным на Рисунке 3.7.



Рисунок 3.6 – Структура системы НЛВ в MATLAB Fuzzy Logic Toolbox [120]

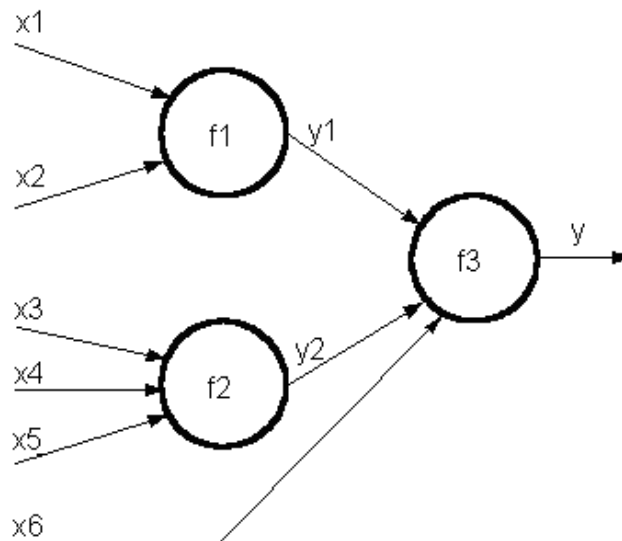


Рисунок 3.7 – Способ учета переменных в иерархической структуре МНЛВ (здесь зависимость $y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ описана тремя базами знаний: $y_1 = f_1(x_1, x_2)$, $y_2 = f_2(x_3, x_4, x_5)$, $y = f_3(x_6, y_1, y_2)$) [119]

Представленный способ позволяет производить расчет результирующих показателей с учетом принципа анализа «опасность-защита», используемого для

воспроизведения уровней защиты между опасностью или причинным событием и результатом (метод LOPA [27]). Для описания состояния уровней защиты в модели использованы показатели фактического соответствия защитных мероприятий установленным нормативным требованиям, что позволяет учитывать влияние возможных отступлений от норм и правил безопасности на уровень профессионального риска. Результаты реализации принципа анализа «опасность-защита», полученные в ходе оценки влияния отдельных факторов на показатель профессионального риска, свидетельствуют о чувствительности МНЛВ к состоянию системы обеспечения безопасности, а также о дифференцировании значений показателя профессионального риска в зависимости от условий эксплуатации угольной шахты. Результаты оценки влияния основных факторов риска и факторов защиты, осуществленной в ходе моделирования, представлены на Рисунке 3.8 (здесь: *a* – интенсивность выделения метана в выработке, *б* – уровень обеспеченности выработки воздухом, *в* – осуществление мероприятий по борьбе с суфлярными выделениями, *г* – уровень соответствия проектной документации установленным требованиям ПБ, *д* – опасность пласта по внезапным выбросам угля (породы) и газа, *е* – уровень интенсивности пылевыведения, *ж* – уровень пылевзрывоопасности выработки, *з* – склонность пласта к самовозгоранию, *и* – степень фрикционной опасности горных пород, *к* – уровень соблюдения требований к осуществлению защитных мероприятий, *л* – уровень трудовой дисциплины на предприятии, *м* – уровень соблюдения требований к осуществлению производственного контроля).

В ходе анализа модели также установлены зависимости показателей выходных переменных в узлах иерархической структуры от входных переменных, использование которых позволяет производить оценку профессионального риска с учетом влияния комплекса факторов, а также производить анализ возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий. Основные зависимости представлены в виде поверхностей в трехмерных координатах на Рисунке 3.9, (здесь: *a* – риск образования взрывоопасной МВС, *б* – риск образования взрывоопасной ПВС, *в* – риск образования взрывоопасной ПВС при

взметывании осевшей пыли; z – риск пользования источником открытого огня, d – риск возникновения электрического разряда, e – риск возникновения высокотемпературного импульса при фрикционном трении, $ж$ – риск возникновения очага самовозгорания, $з$ – риск систематических нарушений требований ПБ персоналом).

Применение разработанной МНЛВ в целях комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли обусловлено наличием следующих функциональных возможностей:

- обработкой неоднородных входных данных, заданных в виде показателей факторов риска и факторов защиты с использованием количественных, порядковых и номинальных шкал измерений;
- преодолением информационной неопределенности входных данных и решением задач формализации взаимосвязей показателей за счет совместного использования количественных зависимостей и результатов экспертных оценок;
- минимизацией степени субъективности экспертных оценок и повышением их информативности за счет моделирования уровня неопределенности в структуре нечетких множеств;
- анализом возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий в геотехнической системе, состояние которой определяется взаимодействием комплекса факторов риска и факторов защиты;
- получением численных показателей в качестве выходных данных, позволяющих производить дальнейшую оценку профессионального риска при сопоставлении с заданным уровнем допустимого риска;
- возможностью непрерывного совершенствования и актуализации базы знаний МНЛВ с целью повышения качества получаемых результатов.

Достижимый практический результат использования МНЛВ заключается в проведении оценки профессионального риска с учетом комплекса горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов, а также в выявлении коренных причин возможных несчастных случаев.

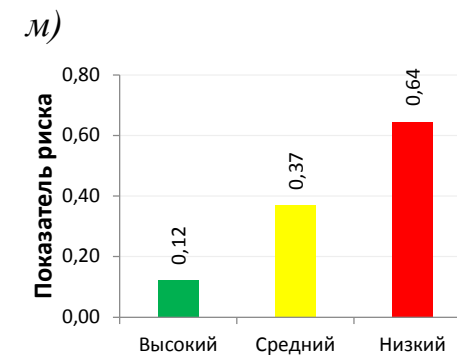
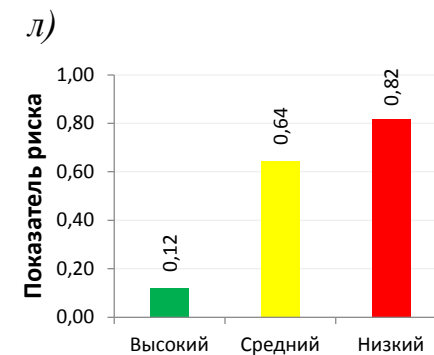
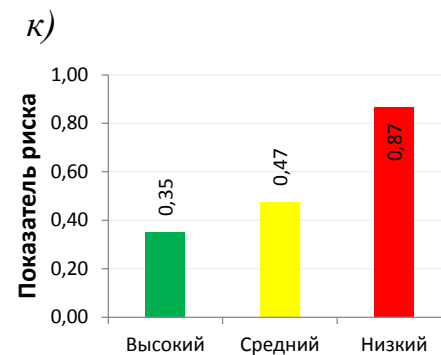
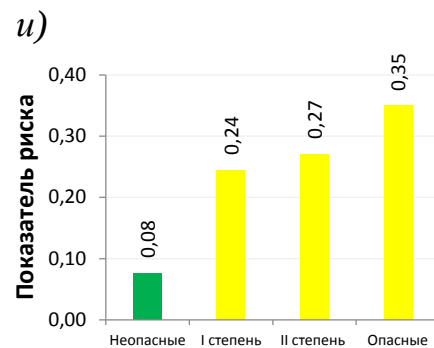
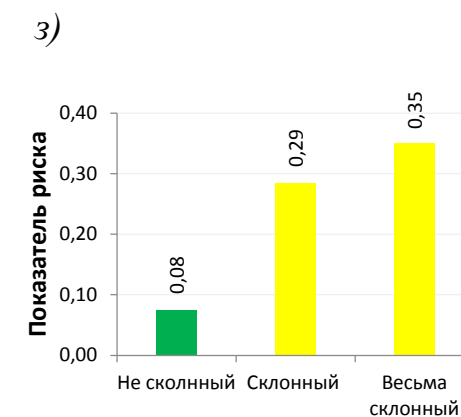
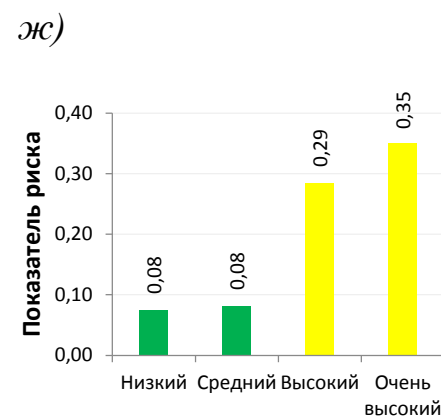
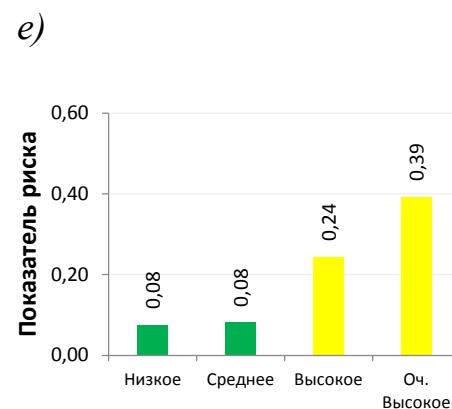
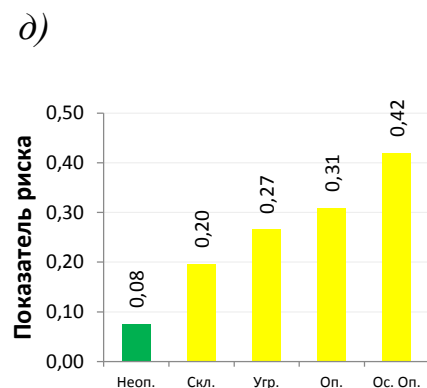
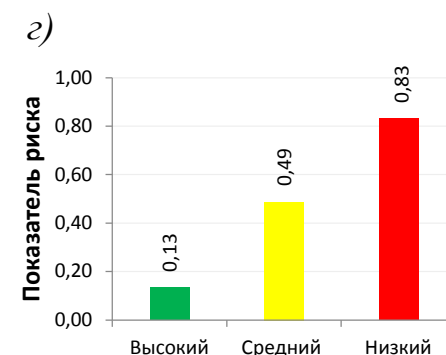
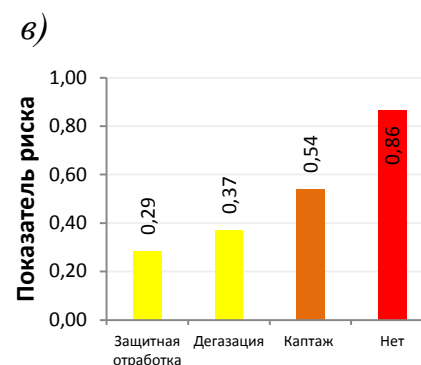
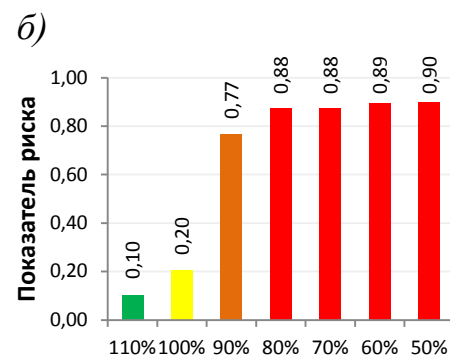
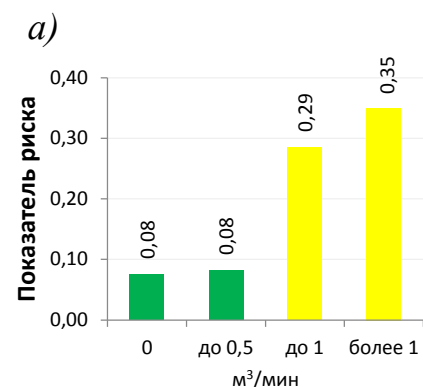
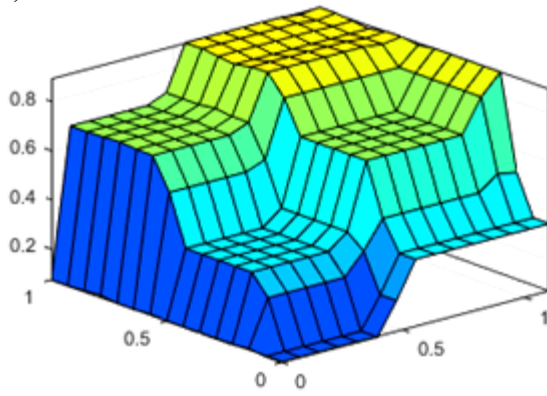
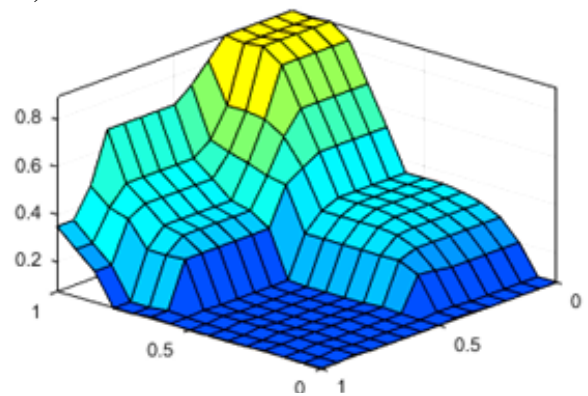


Рисунок 3.8 – Влияние основных факторов риска и факторов защиты на показатель профессионального риска

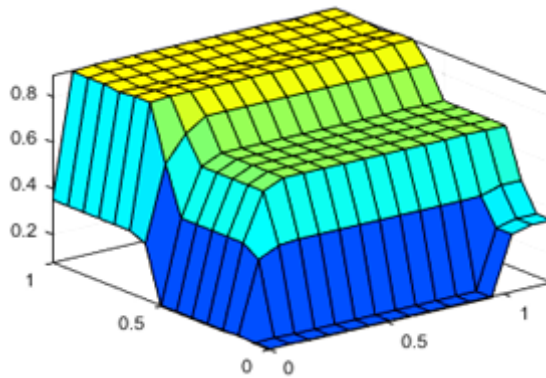
а)



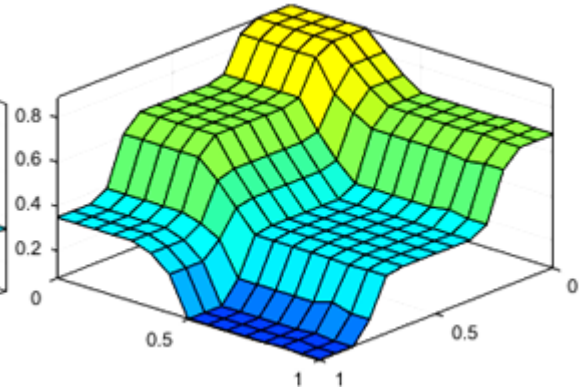
б)



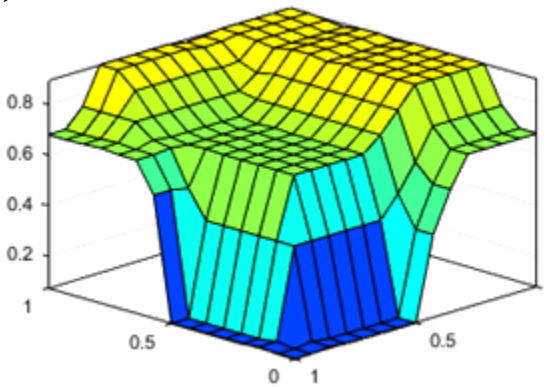
в)



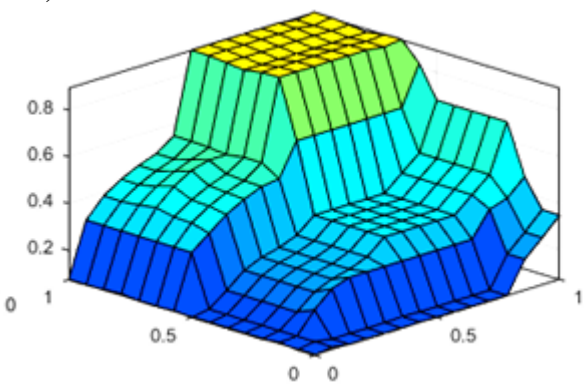
г)



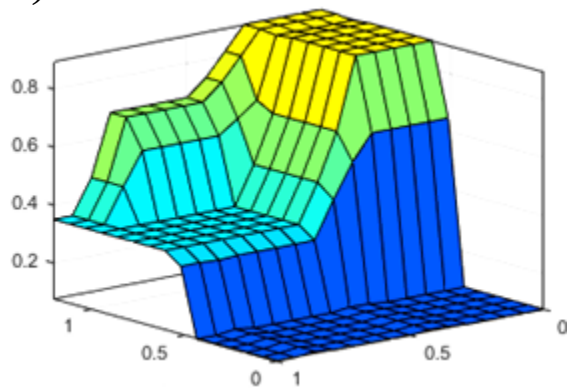
д)



е)



ж)



з)

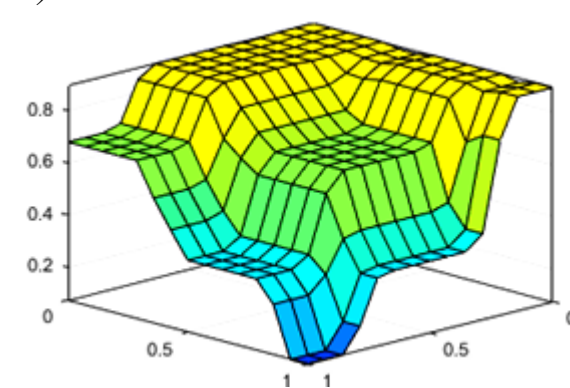


Рисунок 3.9 – Влияние входных переменных на выходные переменные в основных узлах иерархической структуры МНЛВ

Полученная при использовании МНЛВ информация обладает высокой практической значимостью при заблаговременном определении превентивных мер, направленных на предотвращение случаев травмирования персонала при взрывах метана и пыли. Кроме того, возможности МНЛВ позволяют удовлетворить нормативные требования, предъявляемые к процедуре оценки и прогноза профессиональных рисков на угольных шахтах, что обосновывает целесообразность ее применения для достижения цели настоящего исследования.

3.5 Выводы по третьей главе

1. В ходе логико-графического анализа профессионального риска смертельного травмирования персонала при взрывах метана и пыли разработана логическая иерархическая схема, позволяющая учитывать причинно-следственные связи и производить анализ возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий. При этом использована иерархия уровней «факторы причин → причины → условия → событие → последствия события ← факторы последствий события», включающая 90 входных, внутренних и выходных переменных.

2. Для реализации модели экспертной системы на основе нечеткой логики разработан алгоритм, позволяющий формировать базу знаний МНЛВ с совместным учетом комплекса структурных межфакторных связей, полученных в ходе статистического анализа, математического моделирования и экспертной оценки. Для реализации математических операций в МНЛВ выбраны и обоснованы параметры алгоритма нечеткого вывода Мамдани, позволяющего получать численные показатели профессионального риска смертельного травмирования персонала при взрывах метана и пыли.

3. Для преодоления информационной неопределенности при оценке профессионального риска и учета разнородных факторов в МНЛВ использован метод экспертных оценок. При этом для повышения достоверности результатов произведено выражение экспертных оценок в виде нечетких множеств, что

позволило формализовать и объединить оценки группы экспертов, а также учесть уровень неопределенности в структуре нечетких множеств.

4. По результатам анкетирования группы квалифицированных экспертов произведено формирование базы знаний МНЛВ, описывающей совокупность из 90 лингвистических переменных и 970 продукционных правил нечеткого вывода. Формирование базы знаний произведено с учетом разработанной иерархической структуры, а так же результатов количественного анализа профессионального риска и формализации экспертных оценок.

5. Произведено нечеткое моделирование в среде MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, в ходе которого: установлено совместное влияние комплекса горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов на численный показатель профессионального риска смертельного травмирования персонала при взрывах метана и пыли; показано преобладающее влияние организационных и субъективных факторов на показатель профессионального риска, в том числе влияние возможных отступлений от установленных требований промышленной безопасности.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОЦЕНКЕ И ПРОГНОЗУ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНА И ПЫЛИ

4.1 Метод комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли

Для достижения целей СУОТ, направленных на снижение профессиональных рисков и обеспечение безопасности труда, приоритет задач по управлению рисками устанавливается с учетом штатных условий и отклонений в работе, в том числе связанных с аварийными ситуациями. Так, в соответствии с Приказом [83], опасности возможных на угольных шахтах аварий включены в перечень опасностей, представляющих угрозу жизни и здоровью работников, и подлежат анализу с целью установления уровней соответствующих профессиональных рисков. При этом Стандарт [22] устанавливает требование к учету существующей или предполагаемой производственной среды при проведении оценки профессиональных рисков, что подразумевает использование результатов оценки и прогноза риска возможных аварий, получаемых при проведении анализа риска в рамках СУПБ [74]. Таким образом, задача оценки профессиональных рисков поражения персонала угольных шахт при воздействии опасных факторов аварий, в том числе взрывов метана и пыли, находится в области взаимосвязанного функционирования СУОТ и СУПБ [57], представленной на Рисунке 4.1. Кроме того, требования к применению единых принципов обеспечения безопасности ведения работ и контролю соблюдения требований промышленной безопасности и охраны труда на угольных шахтах регламентированы Типовым положением о системе управления промышленной безопасностью и охраной труда (СУПБиОТ) [82].

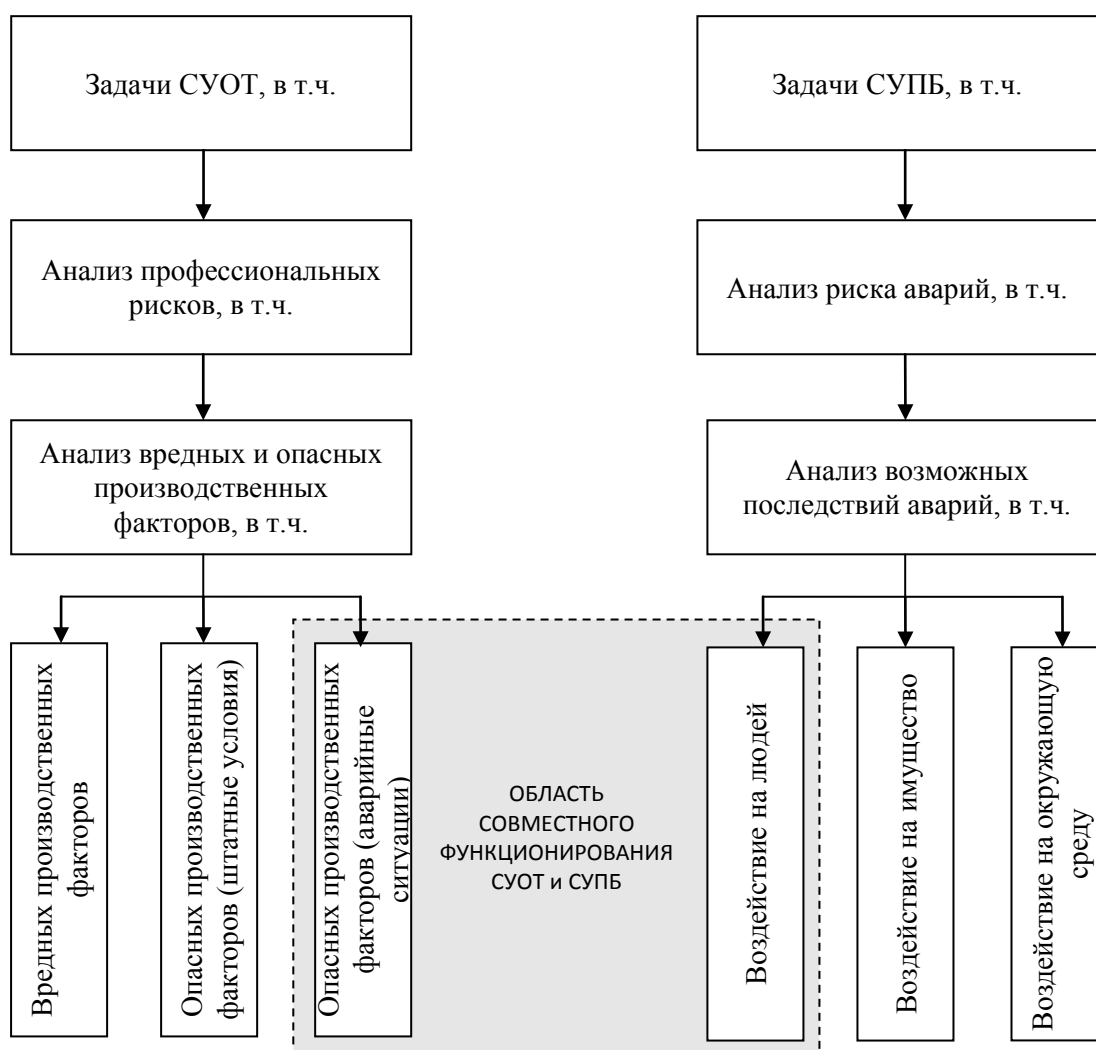


Рисунок 4.1 – Области функционирования СУОТ и СУПБ на угольных шахтах

Решение задачи оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли в рамках функционирования СУПБиОТ предполагает учет результатов оценки и прогноза риска аварий, возникающих в результате взрывов метана и пыли, и решается при использовании метода, основанного на применении разработанной МНЛВ. Для выполнения требований к выявлению потенциально опасных рабочих мест, находящихся в зонах поражающего воздействия ударных волн взрывов метана и пыли на персонал, выполняется дифференцирование участков сети подземных горных выработок на основе сопоставления упорядоченных множеств показателей факторов риска и факторов защиты. Это позволяет определить

комплекс приоритетных мер по снижению профессионального риска путем адресного воздействия на превалирующие факторы риска.

Алгоритм разработанного метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли представлен на Рисунке 4.2 и заключается в проведении следующих этапов:

1. Сбор исходных данных и формирование массива данных, описывающего значения показателей анализируемого комплекса из n факторов f_i , ($1 \leq i \leq n$) в различных точках сети подземных выработок угольной шахты и включающий:

- значения показателей горно-геологических и горнотехнических факторов, характеризующих уровень потенциальной опасности и определяемых в соответствии с фактическими данными, получаемыми в процессе эксплуатации угольной шахты (в том числе методами измерения *in situ* и в ходе лабораторных испытаний);

- значения показателей организационных факторов, характеризующих степень соблюдения установленных требований безопасности и определяемых в ходе ревизии состояния средств обеспечения безопасности;

- значения показателей субъективных факторов, характеризующих уровень трудовой дисциплины и определяемых в соответствии с методами [16, 116], либо на основании результатов экспертной оценки.

При прогнозе профессионального риска для проектируемых выработок (участков выработок) допускается определение исходных данных на основании анализа проектной документации и результатов геологической разведки.

2. Анализ полученного массива данных и разбиение сети подземных выработок угольной шахты на k выработок (участков выработок) в ходе проверки на условие отличия упорядоченных множеств показателей сопряженных выработок (участков выработок) F_j , ($1 \leq j \leq k$):

$$F_j(f_1^j, f_2^j, \dots, f_n^j) \neq F_{j+1}(f_1^{j+1}, f_2^{j+1}, \dots, f_n^{j+1}). \quad (4.1)$$

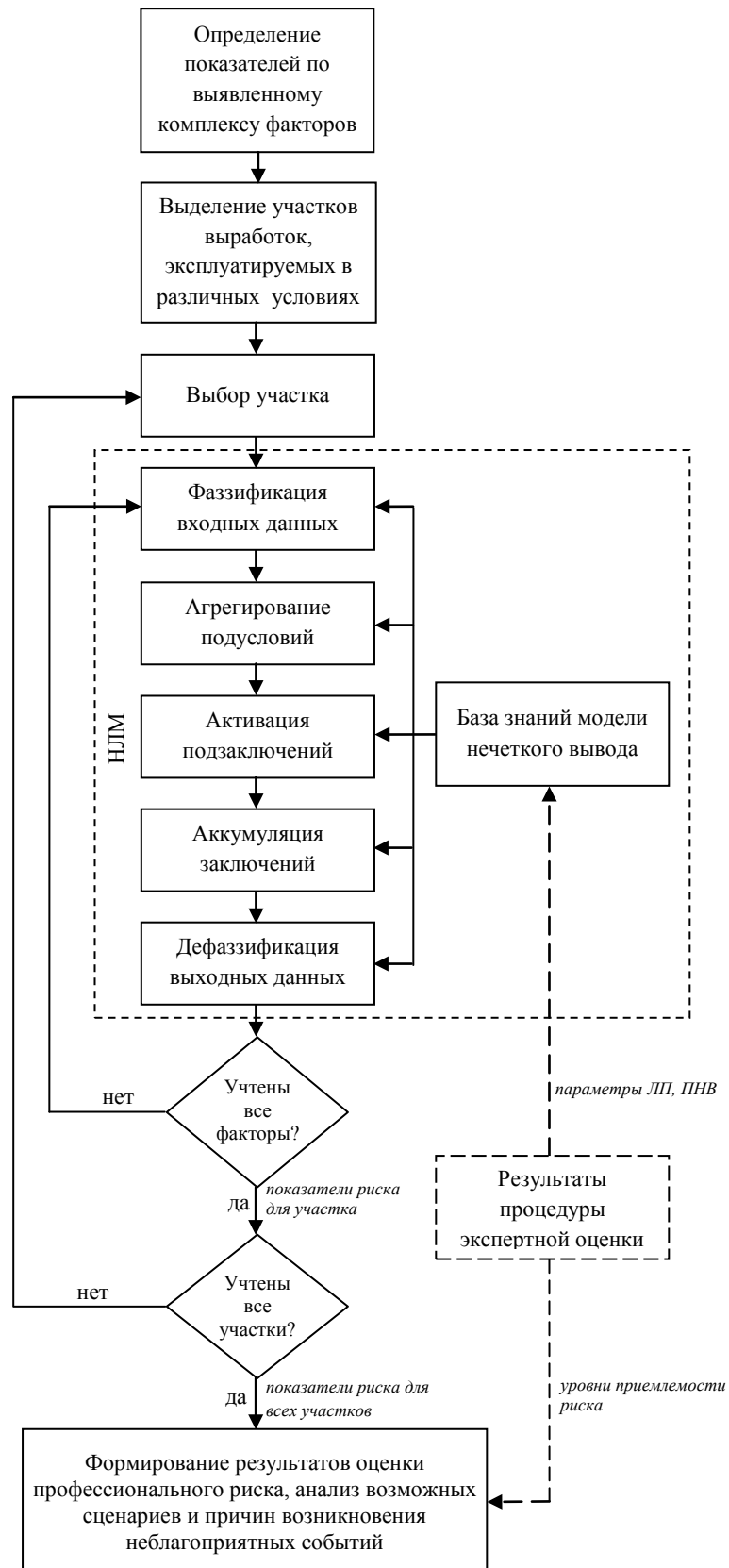


Рисунок 4.2 – Алгоритм метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли

3. Выбор j -ой выработки (участка выработки), анализ упорядоченного множества показателей F_j с использованием разработанной МНЛВ (многократная реализация алгоритма НЛВ в соответствии со сформированной базой знаний) и получение выходных данных:

- численного показателя риска возникновения первичного взрыва МВС/ПВС/МПВС для j -ой выработки (участка выработки);

- численного показателя риска возникновения вторичного взрыва ПВС для j -ой выработки (участка выработки);

- численных показателей профессионального риска травмирования персонала при барическом воздействии ударной волны при первичном взрыве МВС/ПВС/МПВС R_j^1 и вторичном взрыве ПВС R_j^2 для j -ой выработки (участка выработки);

- внутренних численных показателей переменных p , позволяющих проводить анализ возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий.

4. Повторение п. 3 для остальных выработок (участков выработок);

5. Оценка показателей профессионального риска R_j^1 и R_j^2 для k выработок (участков выработок) путем их сравнения с установленными в ходе экспертной оценки уровнями допустимости риска, представленными на Рисунке 4.3.

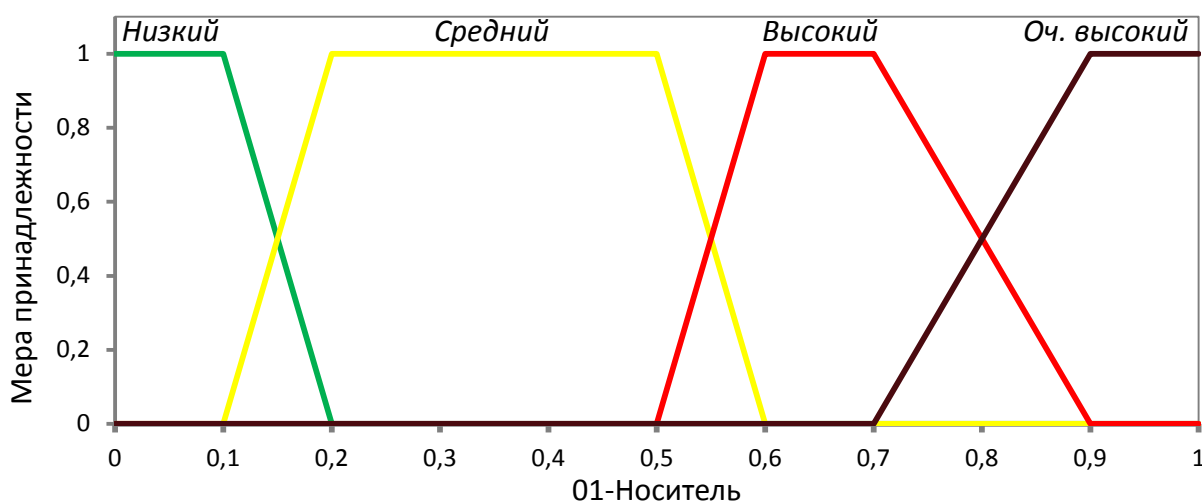


Рисунок 4.3 – Терм-множество лингвистической переменной «Риск»

6. Определение q выработок (участков выработок), находящихся в пределах опасной зоны поражающего воздействия ударной волны взрывов метана и пыли на персонал, показатели профессионального риска которых превышают уровень допустимого риска R_{don} :

$$R_j^1 > R_{don} \vee R_j^2 > R_{don} . \quad (4.2)$$

7. Анализ внутренних численных показателей переменных p для q -ых выработок (участков выработок) на m уровнях иерархии используемой иерархической структуры и определение превалирующего сценария возникновения неблагоприятных событий S_q , обусловленных поражающим воздействием ударной волны взрыва метана и пыли:

$$p_q^k = \max = p_q^{k \max} , \quad (4.3)$$

$$S_q(p_q^{1 \max}, p_q^{2 \max}, \dots, p_q^{k \max}), \quad (4.4)$$

где: k – порядковый номер уровня иерархии ($1 \leq k \leq m$), $p_q^{k \max}$ – максимальный показатель переменной на k -ом уровне иерархии, определенный для q -ой выработки (участка выработки).

8. Анализ сценария S_q для q -ой выработки (участка выработки) и определение коренных причин его возникновения.

Реализация данного алгоритма позволяет осуществить метод оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, в ходе которого производится учет комплекса выявленных факторов риска и факторов защиты, выполняется прогнозирование опасных зон и опасных ситуаций, обусловленных поражающим воздействием ударных волн взрывов метана и пыли на персонал. При этом результаты анализа превалирующих сценариев возникновения неблагоприятных событий позволяют установить перечень коренных причин травмирования персонала, учет которых необходим для своевременного принятия превентивных мер по предотвращению травматизма. Таким образом, при использовании разработанного метода предоставляется необходимый для реализации РОП уровень информационного обеспечения, выполняются требования к оценке и прогнозу профессиональных

рисков, регламентированные нормативной документацией [62, 74, 82, 83], а также осуществляется адресный подход к выбору и реализации мероприятий, направленных на повышение безопасности труда персонала угольных шахт. Приведенный алгоритм оценки риска отражен в заявке на выдачу патента на изобретение «Способ оценки риска взрывов метана и пыли в шахтах» (№ 2017133361 от 27.09.2017).

4.2 Разработка и апробация программного комплекса расчета показателей профессионального риска

Процесс расчета, оценки и прогноза численных показателей профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли с использованием разработанного метода обладает итеративным характером и реализуется путем многократного обращения к базе знаний МНЛВ, содержащей значительный объем данных. Для автоматизации указанных процессов и обеспечения возможности использования метода в реальных условиях производства, установленные при моделировании связи использованы для создания специализированной информационной системы в среде разработки Embarcadero Delphi 10.1. В результате получен программный комплекс расчета показателей риска (ПКРПР), позволяющий проводить экспресс-оценку профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли с осуществлением анализа возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий [64]. Структура ПКРПР воспроизводит иерархическую структуру базы знаний МНЛВ и включает элементы, представленные на Рисунке 4.4. По мере совершенствования базы знаний МНЛВ структура ПКРПР может дополняться новыми элементами и модулями с целью повышения достоверности получаемых результатов и развития функциональности ПКРПР.

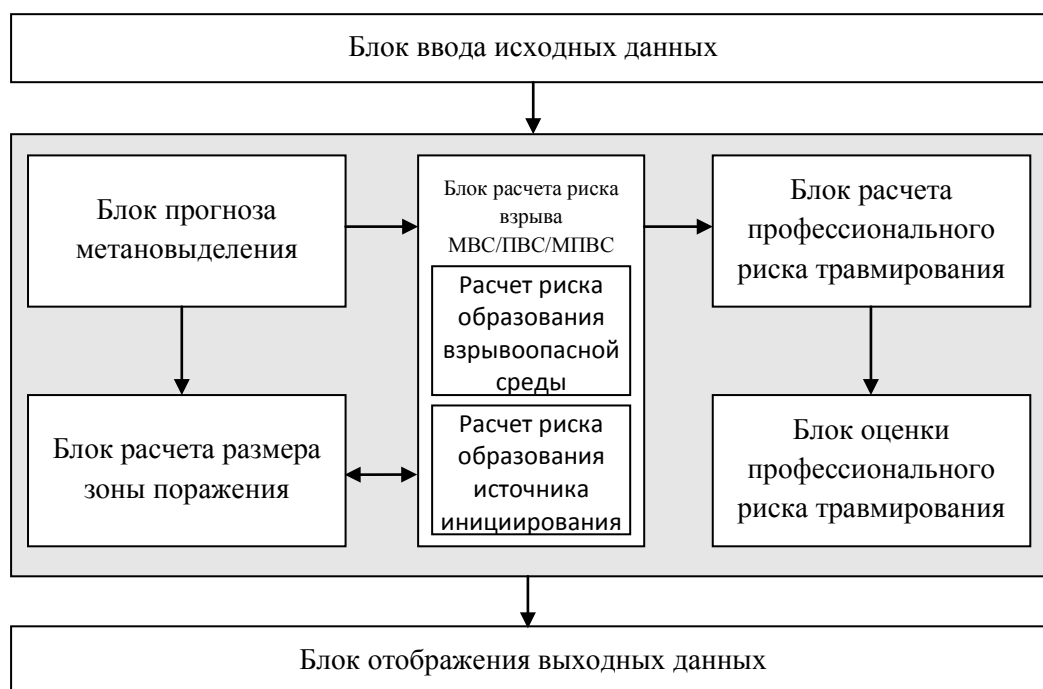


Рисунок 4.4 – Основные элементы структуры ПКРПП

ПКРПП имеет графический пользовательский интерфейс, который состоит из следующих блоков:

1. Блок ввода исходных данных (Рисунок 4.5) – выполнен в формате опросного листа и включает панели ввода показателей используемых в МНЛВ горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов.

2. Блок расчета метановыделения в выработки (Рисунок 4.6) – включает панели ввода показателей, необходимых для расчета прогнозного метановыделения в очистной и подготовительный забои в соответствии с результатами анализа, приведенными в Разделе 2.3.

3. Блок отображения выходных данных (Рисунок 4.7) – отображает численные показатели и результаты оценки, полученные при обработке входных данных с помощью зависимостей, установленных при использовании разработанной модели МНЛВ.

а) б) в)

The figure shows three screenshots of the PKRPP software interface, labeled а), б), and в). Each screenshot displays a window titled 'Расчет риска поражения персонала при взрыве МС/ПЗ' (Calculation of the risk of personnel injury in the event of an explosion of MS/PS). The interface is divided into three main sections: 'Горно-геологические факторы' (Geological factors), 'Технологические факторы' (Technological factors), and 'Организационные и субъективные факторы' (Organizational and subjective factors).
 - Screenshot а) shows the 'Горно-геологические факторы' section with various input fields for geological parameters.
 - Screenshot б) shows the 'Технологические факторы' section with input fields for technological parameters.
 - Screenshot в) shows the 'Организационные и субъективные факторы' section with input fields for organizational and subjective parameters.

Рисунок 4.5 – Интерфейс ПКРПП: блок ввода данных (а – показателей горно-геологических факторов, б – показателей горнотехнических факторов, в – показателей организационных и субъективных факторов)

а) б)

The figure shows two screenshots of the PKRPP software interface, labeled а) and б). Both screenshots display a window titled 'Расчет метановыделения' (Calculation of methane release).
 - Screenshot а) shows the 'Расчет метановыделения в очистной забой' (Calculation of methane release in the cleaning working) window. It contains input fields for: 'Природная метаносность разрабатываемого пласта' (Natural methane content of the developed seam), 'Природная метаносность вмещающих пород' (Natural methane content of the surrounding rocks), 'Степень дегазации разрабатываемого пласта' (Degree of degassing of the developed seam), 'Суточная производительность очистного забоя' (Daily productivity of the cleaning working), 'Скорость подвигания очистного забоя' (Speed of advancing the cleaning working), 'Время транспортирования угля в лаге' (Time of coal transport in the lag), 'Длина очистного забоя' (Length of the cleaning working), and 'Природная метаносность пласта-спутника №1' (Natural methane content of the seam-associate No. 1).
 - Screenshot б) shows the 'Расчет метановыделения в подготовительный забой' (Calculation of methane release in the preparatory working) window. It contains input fields for: 'Природная метаносность разрабатываемого пласта' (Natural methane content of the developed seam), 'Степень дегазации разрабатываемого пласта' (Degree of degassing of the developed seam), 'Мощность угольных пачек' (Thickness of coal layers), 'Скорость подвигания подготовительного забоя' (Speed of advancing the preparatory working), and 'Способ проходки подготовительного забоя' (Method of driving the preparatory working).

Рисунок 4.6 – Интерфейс ПКРПП: блок расчета метановыделения в выработки (а – в очистной забой; б – в подготовительный забой)

Анализ сценариев	
Риск поражения персонала при первичном взрыве МВС/ПВС/МПВС:	0.675
Риск поражения персонала при вторичном взрыве ПВС:	0.315
Риск первичного взрыва МВС/ПВС/МПВС:	0.725
Возникновение взрывоопасной среды:	
1. Риск возникновения взрывоопасной МВС в результате метановыделения:	0.630
- уровень интенсивности метановыделения в выработке:	0.905
- риск образования зон с недостаточным проветриванием:	0.715
2. Риск возникновения взрывоопасной МВС в результате суффляного выделения метана:	0.315
- опасность пласта по суффляным выделениям:	0.220
- уровень защиты от суффляных выделений:	0.750
3. Риск возникновения взрывоопасной МВС в результате внезапного выброса газа:	0.315
- опасность пласта по внезапным выбросам:	0.220
- уровень защиты от внезапных выбросов:	0.750
4. Риск возникновения взрывоопасной ПВС:	0.370
- уровень интенсивности выделения взрывоопасной пыли в воздух выработки:	0.815
- уровень организации мероприятий по обеспыливанию воздуха:	0.900
5. Риск возникновения взрывоопасной МПВС:	0.725
Возникновение высокотемпературного импульса:	
1. Риск возникновения очага самовозгорания угля:	0.220
- склонность пласта к самовозгоранию:	0.315
- уровень защиты от самовозгорания:	0.900
2. Риск возникновения электрического искрового/дугового разряда:	0.890
- наличие электрооборудования под напряжением:	0.900
- уровень мероприятий по обеспечению взрывобезопасности электрооборудования:	0.215
3. Риск фрикционного искрения горных пород:	0.215
- степень фрикционной опасности горных пород:	0.290
- уровень мероприятий по предупреждению фрикционного искрения:	0.900
4. Риск пользования открытым огнем:	0.405
- уровень трудовой дисциплины:	0.645
- уровень контроля ИТР за соблюдением ПБ:	0.900
Риск вторичного взрыва ПВС:	0.370
- уровень пылевзрывоопасности выработок:	0.550
- уровень мероприятий по предупреждению взрывов угольной пыли:	0.645
- уровень мероприятий по локализации взрывов угольной пыли:	0.900

Рисунок 4.7 – Интерфейс ПКРПР: блок вывода данных

Результатом использования ПКРПР является получение численных показателей, позволяющих производить оценку и прогноз профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, а также анализ возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий путем сравнения значений показателей, соответствующих различным узлам используемой иерархической структуры (Рисунок 3.1). Таким образом, применение ПКРПР в рамках разработанного метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска позволяет производить анализ риска в отношении различных выработок (участков выработок) угольной шахты и рабочих мест, выявлять тем самым опасные ситуации и опасные зоны, и выполнять требования к оценке профессиональных рисков, регламентированные нормативной документацией [62, 74, 82, 83].

Для апробации ПКРПР использованы материалы актов технического расследования причин аварий с ГНС, произошедших в результате взрывов метана и пыли на угольных шахтах в 2005-2016 гг. При этом учитывались данные о

характеристиках аварийных участков и допущенных на момент аварии нарушениях, установленных в ходе расследования ГНС. Указанные исходные данные также использованы для расчета показателей риска в соответствии с действующим Руководством по безопасности [63]. При этом ввиду характера анализируемых аварий и методологии определения ИОА [51], в качестве неблагоприятного события рассматривается травмирование персонала при взрывах метана и пыли, что позволяет использовать предложенный в Руководстве [63] индекс опасности для оценки профессионального риска. Полученные результаты представлены в Таблице 4.1.

В результате апробации ПКРПР получены численные показатели профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли на момент аварии, а также произведен детальный анализ возможных сценариев возникновения неблагоприятных событий с установлением коренных причин несчастных случаев. Полученные данные позволяют выполнять комплексную оценку и прогноз профессионального риска, осуществлять заблаговременное выявление опасных событий и ситуаций с учетом комплекса факторов риска и факторов защиты, а также производить выбор превентивных мероприятий, направленных на устранение потенциальных причин возникновения несчастных случаев.

Сопоставление результатов использования ПКРПР и метода, приведенного в Руководстве [63], свидетельствует о повышении достоверности и информативности выходных данных при проведении оценки профессионального риска с использованием разработанной МНЛВ. Указанное преимущество достигается за счет учета взаимного влияния факторов, в том числе наличия отступлений от установленных требований, норм и правил промышленной безопасности. Результаты сравнительного анализа указанных методов представлены в Таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Результаты апробации и сравнительного анализа ПКРПР на примере произошедших ГНС по причинам взрывов метана и пыли

№	Шахта (выработка)	Дата ГНС	Показатель проф. риска, установленный в соответствии с [63]	Результаты анализа риска, установленные с использованием ПКРПР		
				Показатель проф. риска	Причина образования взрывоопасной смеси	Причина образования высокотемпературного источника инициирования
1	Ульяновская (Лава 50-11 бис)	19.03.07	0,27 (Малый уровень риска)	0,860 (Очень высокий риск)	Низкий уровень соответствия проектной и технической документации в части технических решений по вентиляции выработок установленным требованиям, нормам и правилам ПБ	Низкий уровень организации и выполнения мероприятий по обеспечению взрывобезопасности электрооборудования
2	Распадская (Лава 5а-6-18)	08.05.10	0,51 (Средний уровень риска)	0,754 (Высокий риск)	Низкий уровень организации и выполнения мероприятий по предупреждению взрывов угольной пыли	Низкий уровень соблюдения установленных требований к выполнению мероприятий по предупреждению эндогенных пожаров
3	Юбилейная (Лава 16-15)	24.05.07	0,66 (Чрезвычайно высокий уровень риска)	0,835 (Очень высокий риск)	Низкий уровень соблюдения требований, установленных проектной и технической документацией в части технических решений по вентиляции выработок	Низкий уровень организации и выполнения мероприятий по обеспечению взрывобезопасности электрооборудования
4	Северная (Выемочный участок лавы 412-з)	25.02.16	0,47 (Средний уровень риска)	0,780 (Высокий риск)	Низкий уровень соответствия принятых технических решений по вентиляции выработок установленным требованиям, нормам и правилам ПБ	Низкий уровень соблюдения установленных требований к применению электрооборудования во взрывоопасных средах

Продолжение таблицы 4.1

№	Шахта (выработка)	Дата ГНС	Показатель проф. риска, установленный в соответствии с [63]	Результаты анализа риска, установленные с использованием ПКРПР		
				Показатель проф. риска	Причина образования взрывоопасной смеси	Причина образования высокотемпературного источника инициирования
5	Есаульская (Сбойка конвейерного штрека 29-26)	09.02.05	0,33 (Малый уровень риска)	0,855 (Очень высокий риск)	Низкий уровень соблюдения требований, установленных проектной и технической документацией в части технических решений по вентиляции выработок	Низкий уровень соблюдения установленных требований к выполнению мероприятий по предупреждению эндогенных пожаров
6	Воркутинская (Рельсовый уклон 35)	11.02.13	0,48 (Средний уровень риска)	0,830 (Очень высокий риск)	Низкий уровень организации и выполнения мероприятий по предупреждению взрывов угольной пыли	Низкий уровень соблюдения установленных требований к применению электрооборудования во взрывоопасных средах
7	Ялевского (Конвейерный штрек 52-09)	20.01.13	0,42 (Средний уровень риска)	0,725 (Высокий риск)	Низкий уровень соблюдения требований, установленных проектной и технической документацией в части технических решений по вентиляции выработок	Низкий уровень соблюдения установленных требований к применению систем взрывозащитного орошения выемочных и проходческих технических устройств
8	им. В.И. Ленина (Лава 0-6-1-13)	29.07.08	0,38 (Малый уровень риска)	0,790 (Высокий риск)	Низкий уровень соблюдения требований, установленных проектной и технической документацией в части технических решений по вентиляции выработок	Низкий уровень соблюдения установленных требований к выполнению мероприятий по предупреждению эндогенных пожаров

Таблица 4.2 – Сравнительный анализ методов оценки и прогноза профессионального риска

№	Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах» [63]	Метод комплексной оценки и прогноза профессионального риска с использованием ПКРПР	Достигнутое преимущество
1	Позволяет проводить расчет и оценку численных показателей профессионального риска	Позволяет проводить расчет и оценку численных показателей профессионального риска с осуществлением анализа возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий	Увеличение информативности результатов оценки профессионального риска
2	Учитывает воздействие отдельных факторов на показатели профессионального риска	Учитывает совместное воздействие факторов на показатели профессионального риска	Учет синергетического эффекта при воздействии факторов риска
3	Учитывает результаты экспертных оценок	Учитывает результаты статистического анализа, математического моделирования и экспертных оценок при их совместном использовании	Увеличение степени достоверности результатов оценки риска
4	Учитывает при экспертном оценивании субъективное мнение эксперта в виде числовой оценки	Учитывает при экспертном оценивании субъективное мнение эксперта и уровень неопределенности в структуре нечеткого числа	Увеличение информативности результатов оценки профессионального риска
5	Основан на заполнении и ручной обработке проверочных листов	Основан на использовании ПКРПР-интерфейса, позволяющего автоматизировать процедуру расчета численных показателей риска	Удобство применения, возможность использования широким кругом пользователей
6	Учитывает ограниченный набор факторов	Учитывает комплекс факторов, установленный в ходе ретроспективного анализа произошедших аварий и НС	Увеличение степени достоверности результатов оценки риска
7	Учитывает произошедшие случаи возникновения взрывов метана и пыли	Учитывает отступления от норм и правил ПБ	Переход к априорному анализу и выполнение принципов РОП
8	Может применяться в статическом режиме анализа	Может применяться в статическом и динамическом режимах	Возможность осуществления дистанционного мониторинга риска в режиме реального времени

В ходе апробации установлено, что ПКРПР позволяет преодолеть недостатки существующих методов оценки профессионального риска, а также делает возможным реализацию экспресс-оценки риска широким кругом пользователей. Таким образом, использование ПКРПР в основе разработанного метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли позволяет выполнять прогноз опасных ситуаций и опасных зон, обусловленных воздействием на работающих поражающих факторов взрыва, а также осуществлять адресный подход при выборе и обосновании превентивных организационно-технических мероприятий, направленных на снижение уровня производственного травматизма.

4.3 Рекомендации по повышению безопасности труда на основе организации системы менеджмента профессиональных рисков

Процессы обеспечения безопасности труда на угольных шахтах должны реализовываться в рамках скоординированной деятельности организации по управлению профессиональными рисками. Для этого в общую стратегию и практическую деятельность организации необходимо интегрировать систему менеджмента профессиональных рисков, направленную на достижение целей и задач по сохранению жизни и здоровья работников в процессе труда. При этом высокая эффективность системы менеджмента профессиональных рисков может быть достигнута при условии ее практической реализации на всех уровнях управления и на всех стадиях жизненного цикла организации.

Семейство стандартов ГОСТ Р ИСО 31000:2010 отражает базовые принципы организации систем менеджмента рисков и подразумевает реализацию структуры процесса менеджмента рисков, представленную на Рисунке 4.8.

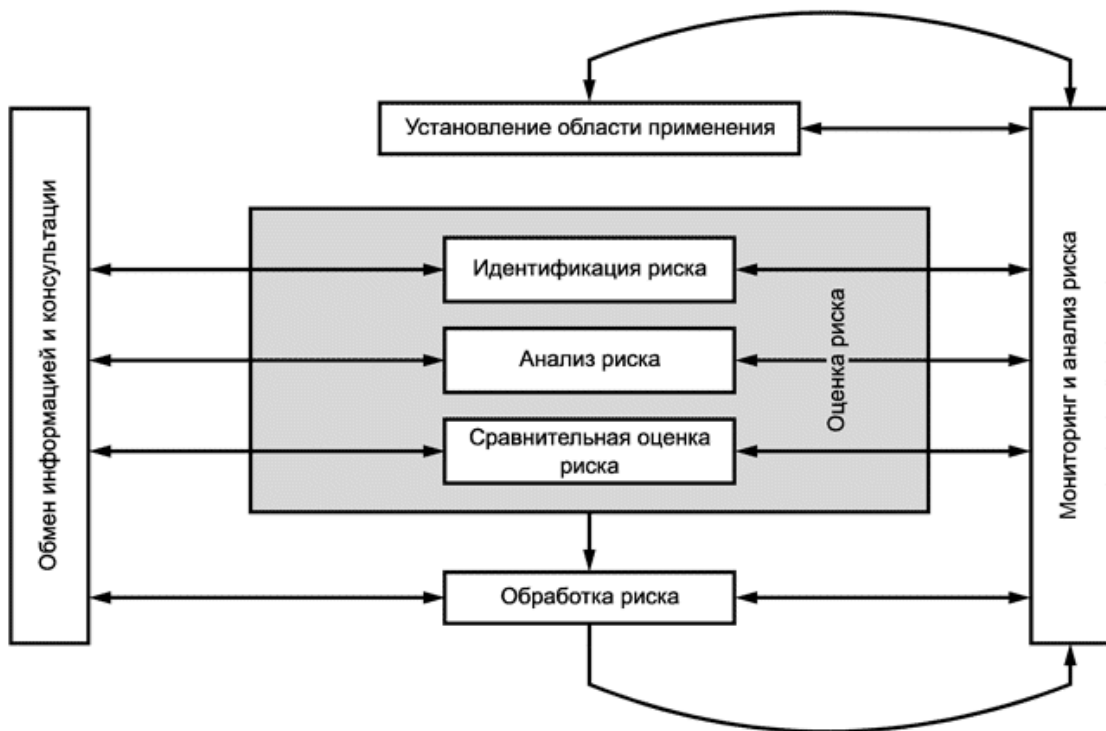


Рисунок 4.8 – Процесс менеджмента риска [26]

В соответствии с [26], процесс менеджмента профессиональных рисков содержит следующие стадии:

- обмен информацией и консультирование: выполняется с целью предоставления всесторонней информации о существующих профессиональных рисках от внешних и внутренних заинтересованных сторон, используемой в процессе принятия решений;

- установление контекста: подразумевает определение целей менеджмента профессиональных рисков, области применения, критериев и структуры профессиональных рисков, а так же внешних и внутренних параметров, принимаемых во внимание в процессе управления профессиональными рисками;

- оценка профессиональных рисков – целостный процесс, включающий:

- а) идентификацию рисков – обнаружение, регистрацию и описание профессиональных рисков, оказывающих влияние на достижение целей и задач по сохранению жизни и здоровья работников в процессе труда;

- б) анализ рисков – изучение выявленных профессиональных рисков, их причин, последствий, а также особенностей происходящих событий;

в) сравнительную оценку рисков – проведение оценки профессиональных рисков с дальнейшим сравнением результатов с установленными критериями, необходимыми для принятия решений о необходимости обработки профессиональных рисков и о приоритете практической реализации обработки;

- обработка профессионального риска (воздействие на риск): циклический процесс, подразумевающий выбор и применение вариантов модифицирования риска с дальнейшим определением степени приемлемости обработанного риска;

- мониторинг и пересмотр: содержат все аспекты процессов менеджмента профессиональных рисков с целью выявления изменений внешних и внутренних контекстов проекта, получения дальнейшей информации для улучшения оценки риска и повышения эффективности обработки риска, а так же анализ результатов обработки риска и идентификацию зарождающихся профессиональных рисков.

Анализ возможности практической реализации систем менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах показал, что на практике значительную сложность вызывает этап оценки рисков, который является основополагающим при анализе профессиональных рисков и планировании мероприятий по их управлению. Предложенный в настоящей работе методический подход позволяет преодолеть существующие трудности при комплексной оценке профессиональных рисков, а его универсальность предоставляет возможность адаптации к задачам анализа рисков причинения вреда жизни и здоровью работников, обусловленных воздействием различных вредных и опасных факторов производственной среды угольных шахт. В целях обоснования возможности использования разработанного методического подхода при создании эффективной системы менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах, проведен анализ принципов повышения эффективности систем менеджмента рисков, результаты которого представлены в Таблице 4.3 [38].

Таблица 4.3 – Обоснование использования метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска при создании системы менеджмента профессиональных рисков на угольной шахте

№	Принципы повышения эффективности менеджмента рисков [26]	Возможности, достигаемые при использовании разработанного методического подхода к комплексной оценке профессиональных рисков
1	Обеспечение доказательного достижения поставленных целей, совершенствование технологического процесса	Выбор и реализация организационно-технических мероприятий, направленных на достижение целей в области охраны труда, с учетом обоснованных результатов комплексной оценки профессиональных рисков
2	Обеспечение возможности непрерывного совершенствования организации и процесса менеджмента рисков, в т.ч. за счет внедрения разрабатываемых стратегий	
3	Интеграция во все организационные процессы, ассоциированные с проектом, на всех уровнях и на всех стадиях жизненного цикла проекта	Оценка профессиональных рисков с использованием предложенного универсального подхода при реализации организационных процессов на различных уровнях управления и стадиях жизненного цикла угольной шахты в целях обеспечения безопасности труда
4	Предоставление информационного обеспечения для: принятия обоснованных проектных решений на каждой стадии жизненного цикла проекта, учета имеющихся рисков и определения приоритетных и альтернативных действий	
5	Обеспечение возможности анализа, учета и преодоления неопределенностей	Снижение информационной неопределенности путем экспертного оценивания сложноформализуемых связей и представление оценок в виде нечетких множеств, позволяющих моделировать уровень неопределенности в структуре нечеткого числа

Продолжение таблицы 4.3

№	Принципы повышения эффективности менеджмента рисков [26]	Возможности, достигаемые при использовании предложенного метода комплексной оценки профессиональных рисков в рамках системы менеджмента профессиональных рисков
6	Обеспечение принятия актуальных, обоснованных и надежных проектных решений, повышение эффективности процессов управления проектом, за счет реализации систематического, структурного и своевременного подхода к менеджменту рисков и создания его эффективной инфраструктуры	Организация процессного подхода к управлению, основанного на систематической оценке профессиональных рисков и непрерывном совершенствовании моделей расчета численных показателей риска, направленном на выявление и учет вновь выявленных факторов и зависимостей
7	Динамичность и чувствительность к изменениям, обеспечивающие возможность проведения непрерывного и итерационного процесса по идентификации новых и пересмотру ранее выявленных рисков с целью оперативного реагирования на опасности в условиях изменения внешней и внутренней среды проекта	
8	Учет самой надежной и доступной информации в процессе управления рисками, в т.ч. результатов: технического анализа, инспекций, испытаний, наблюдений, экспертных оценок и др.	Совместное использование результатов статистического, вероятностного и экспертного анализа при комплексной оценке профессиональных рисков. Использование коллективных экспертных оценок для снижения субъективности результатов и всестороннего учета мнений
9	Надлежащее и своевременное вовлечение заинтересованных сторон на всех уровнях организации с целью всестороннего учета мнений, обеспечения эффективности и актуальности менеджмента риска	
10	Учет особенностей и специфики проекта, уровня неопределенности и степени сложности выполняемых работ	Учет специфического комплекса горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов при оценке профессиональных рисков с возможностью моделирования неопределенностей при выполнении экспертной оценки
11	Учет субъективных и культурных факторов, влияющих на достижение целей проекта и процессы управления рисками	

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования разработанного методического подхода в качестве инструмента, позволяющего проводить анализ, оценку и прогноз рисков с целью предоставления информации для принятия эффективных управленческих решений, направленных на сохранение жизни и здоровья работников. Значительный потенциал для развития системы менеджмента профессиональных рисков обоснован принципом непрерывного и систематического дополнения базы знаний, используемой в основе МНЛВ. Так, учет новой информации предоставляет возможность актуализации алгоритмов расчета в модели комплексной оценки и прогноза профессиональных рисков, что обладает особым значением при анализе динамической среды угольных шахт и позволяет выполнять требования нормативной документации [82, 83] к совершенствованию процедур анализа рисков.

Таким образом, разработанный методический подход может быть использован для организации непрерывного процесса идентификации опасностей и оценки рисков на угольных шахтах, в том числе выполнения процедур, регламентированных Приказом [82]:

1. Плановой проверки – проводится при изменении горно-геологических и горнотехнических условий, изменениях в технологии производства работ.
2. Внеплановой проверки – проводится при: замене технических устройств для производства горных работ; привлечении подрядных организаций, осуществляющих деятельность на угольной шахте.
3. Периодического отчета – проводится службой промышленной безопасности и охраны труда с целью периодического предоставления данных по идентификации опасностей, оценке и управлению рисками на угольной шахте в управляющую комиссию по оценке состояния ПБ.
4. Регулярного пересмотра – проводится не реже одного раза в 3 года.

Реализация процессов анализа и управления профессиональными рисками на систематической основе позволяет осуществить переход к процессному подходу при управлении рисками. Целесообразность данного подхода

обусловлена природой профессиональных рисков: их зависимостью от организационных факторов, формируемых под влиянием управленческих решений, принимаемых на различных уровнях системы управления. Соответственно, управление профессиональными рисками необходимо рассматривать в качестве кросс-функционального процесса, оптимизация которого заключается в делегировании полномочий контроля и управления рисками, и закреплении наиболее эффективных процедур взаимодействия участников процессов между собой. При этом в качестве критерия эффективности необходимо рассматривать эффективность деятельности по обеспечению безопасности труда, что приведет к формированию мотивационного механизма поддержки непрерывного совершенствования процедуры управления профессиональными рисками. Вместе с тем, реализация кросс-функционального процесса управления профессиональными рисками позволит интегрировать систему менеджмента профессиональных рисков в общую структуру менеджмента организации. Реализация процессного подхода к управлению профессиональными рисками показала высокую эффективность на угледобывающих предприятиях Австралии, США и стран Европы [127, 129, 143], где сформированы рабочие группы, состоящие из представителей различных структурных подразделений. В полномочия рабочих групп входит проведение анализа и оценки профессиональных рисков с дальнейшим консультированием работодателя по вопросу выработки и реализации решений по управлению профессиональными рисками.

Использование разработанного методического подхода предоставляет основу для повышения эффективности оценки профессиональных рисков путем создания систем динамической оценки, позволяющих автоматизировать задачи анализа состояния факторов риска и факторов защиты с применением информационно-измерительных систем дистанционного мониторинга. На угольных шахтах задача оперативной оценки профессиональных рисков и предоставления информационной поддержки принятия решений по их управлению решается в рамках создания динамической модели РОП путем

организации непрерывного дистанционного мониторинга с использованием многофункциональных систем безопасности (МФСБ). При этом разработанная экспертная система на основе нечеткой логики соответствует принципам комплексной обработки данных, получаемых от различных измерительных систем, и может быть использована для решения актуальной задачи [6] алгоритмического обеспечения процессов динамического анализа профессиональных рисков в рамках МФСБ. Практический результат данного решения заключается в получении комплексных показателей профессиональных рисков в режиме реального времени, регистрации отклонений параметров технологических процессов от нормальных значений и выявлении предпосылок возникновения неблагоприятных событий. В свою очередь, это приведет к обеспечению возможности оперативного реагирования на возникновение угроз жизни и здоровью горнорабочих, возникающих в нестационарных условиях эксплуатации угольной шахты [98].

Таким образом показано, что разработанный методический подход отвечает принципам применения РОП и может быть использован в основе создания качественно новой системы обеспечения безопасности труда персонала угольных шахт, направленной на систематический анализ профессиональных рисков и предупреждение несчастных случаев. Использование метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска решает задачу методического обеспечения при создании систем менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах, а также обладает значительным потенциалом для развития механизмов априорного анализа производственной среды угольных шахт.

4.4 Выводы по четвертой главе

1. Проблема оценки профессиональных рисков поражения персонала при воздействии опасных факторов аварий на угольных шахтах находится в области совместного функционирования СУОТ и СУПБ. В связи с чем разработан метод, позволяющий выполнять установленные требования в части комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала при взрывах

метана и пыли с выявлением опасных ситуаций и опасных зон, а также учитывающий результаты комплексной оценки и прогноза риска взрывов метана и пыли.

2. Установленные в ходе применения МНЛВ взаимосвязи показателей иерархической структуры использованы при создании программного комплекса расчета профессионального риска, применение которого позволяет производить комплексную экспресс-оценку профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли с анализом различных сценариев возникновения неблагоприятных событий. Интерфейс ПКРПР выполнен в доступной форме и обеспечивает возможность проведения комплексной оценки профессионального риска широким кругом пользователей в условиях ограниченных организационных ресурсов.

3. Проведенная апробация ПКРПР свидетельствует о возможности преодоления недостатков существующих методов оценки профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли, а также реализации адресного подхода при выборе и обосновании превентивных организационно-технических мероприятий, направленных на снижение уровня производственного травматизма.

4. С учетом результатов проведенных исследований даны рекомендации по повышению безопасности труда персонала угольных шахт, заключающиеся в организации системы менеджмента профессиональных рисков с использованием процессного подхода к управлению рисками, позволяющего реализовать механизмы априорного анализа производственной среды угольных шахт. Показана возможность использования разработанной МНЛВ для решения задачи алгоритмического обеспечения процессов динамического анализа профессиональных рисков, осуществляемых с использованием информационно-измерительных систем дистанционного мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи методического обеспечения комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли, позволяющее повысить безопасность труда персонала угольных шахт. Основные научные и практические результаты выполненных исследований:

1. В результате анализа индивидуального риска гибели персонала угольных шахт за период 2004-2016 гг. установлено первостепенное влияние опасных факторов взрывов метана и пыли на отраслевые показатели смертельного травматизма. Показано, что минимизация профессиональных рисков травмирования персонала при взрывах метана и пыли в современных условиях возможна при применении риск-ориентированного подхода, осуществляемого с использованием метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска.

2. При проведении анализа данных о произошедших в 2005-2016 гг. взрывах метана установлены статистически-значимые связи между показателем индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метанопылевоздушных смесей и относительной газообильностью шахты, системой разработки и склонностью пластов к самовозгоранию. Разработанная с учетом выявленных зависимостей многофакторная регрессионная модель позволяет определять прогнозные значения индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана и выполнять ранжирование и выявление угольных шахт, производственная среда которых характеризуется высоким значением профессионального риска.

3. Разработана модель нечеткого логического вывода для расчета численных показателей профессионального риска, основанная на результатах совместного использования количественных зависимостей и экспертных оценок, и позволяющая производить комплексную оценку и прогноз профессионального риска в условиях информационной неопределенности исходных данных.

Разработаны рекомендации по анализу рисков, вошедшие в Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценке риска аварий на угольных шахтах» (утв. Приказом Ростехнадзора № 192 от 05.06.2017).

4. В ходе реализации модели в среде математического моделирования MATLAB получены поверхности функций нечетких переменных в трехмерных координатах, отображающие совместное воздействие факторов на профессиональный риск. Также установлено значительное влияние организационно-технических факторов, позволяющее производить учет отклонений от требований безопасности при расчете численных показателей профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли.

5. Обоснован и разработан метод, позволяющий выполнять требования, предъявляемые к СУПБиОТ в части комплексной оценки профессионального риска, а также осуществлять прогнозирование опасных ситуаций и опасных зон, обусловленных воздействием на работающих поражающих факторов взрывов метана и пыли.

6. На основе результатов моделирования создано ПКРПР, позволяющее производить комплексную экспресс-оценку профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, выполнять анализ сценариев возникновения неблагоприятных событий, осуществлять адресный подход при выборе и обосновании превентивных организационно-технических мероприятий по снижению уровня производственного травматизма.

7. Приведены рекомендации по использованию разработанного методического подхода для повышения эффективности системы менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах с целью снижения уровня производственного травматизма.

Список сокращений и условных обозначений

АГК – система аэрогазового контроля

ВСПВ – верхний стехиометрический предел взрываемости

ГМ – горный мастер

ГНС – групповой несчастный случай

ГРОЗ – горнорабочий очистного забоя

ГРП – горнорабочий подземный

ДСО – система разработки длинными столбами

ИОА – индекс опасности аварии

КМЗ – комплексно-механизированный очистной забой

ЛП – лингвистическая переменная

МБУ – машинист буровой установки

МВС – метановоздушная смесь

МГВМ – машинист горных выемочных машин

Минобрнауки – Министерство образования и науки Российской Федерации

Минэнерго – Министерство энергетики Российской Федерации

МНЛВ – модель нечеткого логического вывода

МПВС – метанопылевоздушная смесь

МПУ – машинист подземных установок

МФСБ – многофункциональная система безопасности

НЛВ – нечеткий логический вывод

НПВ – нижнего предел взрываемости

НС – несчастный случай

НСПВ – нижний стехиометрический предел взрываемости

НУ – начальник участка

ОПО – опасный производственный объект

ОТ – охрана труда

ПБ – промышленная безопасность

ПВС – пылевоздушная смесь

ПГО – система разработки подэтажной гидроотбойкой

ПКРПР – программный комплекс расчета показателей риска

ПНВ – правило логического вывода

ПШО – система разработки подэтажной отбойкой

РОП – риск-ориентированный подход

Ростехнадзор – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

СУОТ – система управления охраной труда

СУПБ – система управления промышленной безопасностью

СУПБиОТ – система управления промышленной безопасностью и охраной труда

ЩО – щитовая система отработки

ЭП – электрослесарь подземный

ВТА – bow tie analysis, метод анализа «галстук-бабочка»

ЕТА – event tree analysis, метод анализа дерева событий

FTA – fault tree analysis, метод анализа дерева отказов

Список литературы

1. Абрамов, Ф.А. Аэрогазодинамика выемочного участка / Ф.А. Абрамов, Б.Е. Грецингер, В.В. Соболевский, Г.А. Шевелев. – Киев: Наукова думка, 1972. – 236 с.
2. Адамчук, В.В. Экономика и социология труда: учебник для вузов / В.В. Адамчук, О.В. Ромашов, М.Е. Сорокина. – М.: ЮНИТИ, 2000. – 407 с.
3. Айруни, А.Т. Взрывоопасность угольных шахт / А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов, О.В. Смирнов. – М.: Изд-во. «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 264 с.
4. Айруни, А.Т. Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах / А.Т. Айруни. – М.: Недра, 1981. – 335 с.
5. Аношина, И.М. Расчет техногенного риска аварий на угольных шахтах / И.М. Аношина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 2. – С. 130-138.
6. Бабенко, А.Г. Анализ основ построения многофункциональных систем безопасности угольных шахт / А.Г. Бабенко // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 3. – С. 40-47.
7. Бабенко, А.Г. Количественное оценивание текущего риска эксплуатации угольной шахты / А.Г. Бабенко // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – № 4. – С. 24-35.
8. Бабенко, А.Г. Теоретическое обоснование и методология повышения уровня охраны труда в угольных шахтах на основе риск-ориентированного подхода и многофункциональных систем безопасности: Дис. ... докт. техн. наук: 05.26.01 / Бабенко Александр Григорьевич. – СПб., 2018. – 259 с.
9. Баловцев, С.В. Анализ причинно-следственных связей между событиями, приводящими к чрезвычайным ситуациям на угольных шахтах / С.В. Баловцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 7. – С. 328-332.
10. Баловцев, С.В. Управление производственными рисками на угольных шахтах на основе ранжирования требований безопасности / С.В. Баловцев,

О.В. Воробьева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 12. – С. 15-20.

11. Баскаков, В.П. Оценка рисков аварий, инцидентов и несчастных случаев. Планы управления безопасностью труда / В.П. Баскаков, В.И. Ефимов, Г.И. Сенаторов // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2011. – Вып. 1. – С. 22-35.

12. Большинский, М.И. Газодинамические явления в шахтах / М.И. Большинский, Б.А. Лысиков, А.А. Каплюхин. – Севастополь: Вебер, 2003. – 284 с.

13. Васильев, А.А. Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли / А.А. Васильев, В.А. Васильев // Научно-технический журнал «Вестник». – 2016. – № 2. – С. 8-39.

14. Вишняков, Я.Д. Общая теория рисков: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Я.Д. Вишняков, Н.Н. Радаев. – М.: Академия, 2008. – 368 с.

15. Воробьев, Б.М. Уголь мира. Том III. Уголь Евразии / Б.М. Воробьев. – М.: Горная книга, 2013. – 752 с.

16. Воробьева, О.В. Влияние человеческого фактора на риск аварий и травм в системе производственного контроля состояния промышленной безопасности на угледобывающих предприятиях / О.В. Воробьева, А.А. Сальников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. – С. 111-119.

17. Воскобойников, Ю.Е. Эконометрика в Excel. Часть 1 (парный и множественный регрессионный анализ): учеб. пособие / Ю.Е. Воскобойников. – Новосибирск: НГАСУ, 2005. – 156 с.

18. Востоков, В.Ю. К вопросу выбора вида пробит-функций для определения вероятности поражения человека ударной волной / В.Ю. Востоков // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 130-133.

19. Гавриленко, М.А. Применение теории нечетких множеств в оценке рисков инвестиционных проектов / М.А. Гавриленко // Аудит и финансовый анализ. – 2013. – № 3. – С. 75-81.

20. Гончаров, Е.В. Геодинамические методы оценки распределения метана в каменноугольных месторождениях и мероприятия по интенсификации метанопритоков при скважинных методах дегазации / Е.В. Гончаров, С.В. Цирель // Записки Горного института. – 2016. – Т. 222. – С. 803-808.

21. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ. – 2016. – 16 с.

22. ГОСТ 12.0.230-2007. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы управления охраной труда. Общие требования. – М.: Стандартинформ. – 2007. – 25 с.

23. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 86 с.

24. ГОСТ Р 50544-93. Породы горные. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов. – 1993. – 49 с.

25. ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. – М.: Издательство стандартов. – 2002. – 28 с.

26. ГОСТ Р 56275-2014. Менеджмент рисков. Руководство по надлежащей практике менеджмента рисков проектов. – М.: Стандартинформ. – 2015. – 28 с.

27. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. – М.: Стандартинформ. – 2012. – 74 с.

28. Гражданкин, А.И. Анализ опасностей и оценка риска крупных аварий в нефтегазовой и угольной промышленности: Дис. ... докт. техн. наук: 05.26.03 / Гражданкин Александр Иванович. – М., 2016. – 340 с.

29. Гражданкин, А.И. О риск-ориентированном подходе в обеспечении промышленной безопасности [Электронный ресурс] / А.И. Гражданкин // Анализ опасностей и оценка техногенного риска. – URL: http://riskprom.ru/TemaKtlg/RiskAvar/pon_oprd/RiskOrient_2012.pdf

30. Давыдов, А.В. Анализ существующих методов и выбор критериев базовой оценки рисков в области охраны труда в условиях горных предприятий /

А.В. Давыдов, А.М. Голышев, Е.В. Пищикова // Вестник Криворожского национального университета. – 2012. – № 3 (32). – С. 58-63.

31. Доклад министра энергетики РФ А.В. Новака «О состоянии и перспективах развития угольной промышленности» [Электронный ресурс] / Министерство энергетики. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/4882>

32. Домрачев, А.Н. Использование аппарата нейронных сетей и нечеткой логики при оценке вероятности взрыва пылеметановоздушной смеси / А.Н. Домрачев, Д.Ю. Палеев, Ю.М. Говорухин и др. // Научно-технический журнал «Вестник». – 2014. – № 1. – С. 40-43.

33. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс] / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/

34. Ефремов, И.В. Надежность технических систем и техногенный риск / И.В. Ефремов, Н.Н. Рахимова. – Оренбург: ОГУ, 2013. – 163 с.

35. Забурдяев, В.С. Способ прогноза взрывоопасности метановоздушных смесей в шахтах: пат. РФ 2524860 / В.С. Забурдяев // Бюл. №22 – 2014.

36. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: пер. / науч. ред. А.Н. Колмогоров, С.П. Новиков; пер. с англ. Н.И. Ринго и др. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

37. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа (РД 05-350-00). Сер. 05. Вып. 2 / Кол. авт. – М.: ФГУП «НТУ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. – 183 с.

38. Кабанов, Е.И. Использование модели нечеткого вывода при организации менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах / Е.И. Кабанов // Вестник современных исследований. – 2018. – № 6-1(21). – С. 400-402.

39. Кабанов, Е.И. Оценка риска взрывов метана на угольных шахтах России / Е.И. Кабанов // Международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования», Санкт-Петербург, 19-21 апреля 2017 г.: Сборник научных

трудов. Часть II / Санкт-Петербургский горный университет. – СПб., – 2017. – С. 31.

40. Кабанов, Е.И. Разработка модели экспертной системы на основе нечеткой логики для проведения оценки риска взрывов метана и пыли на угольных шахтах / Е.И. Кабанов, Г.И. Коршунов, Л.В. Пихконен, В.А. Родионов // Международная горноспасательная конференция «IMRB – 2017», Новокузнецк, 4-7 сентября 2017.: Сборник тезисов. – Новокузнецк, – 2017. – С. 64-65.

41. Калякин, С. Влияние примесей шахтных горючих газов на взрывоопасность угольных аэрозолей / С. Калякин, В. Костенко, Е. Завьялова, Л. Штрох // *Gornictwo I Geologia*. – 2012. – Т. 7. – С. 31-40.

42. Качурин, Н.М. Выделение метана с поверхности обнажения угольного пласта в подготовительную выработку / Н.М. Качурин, Н.О. Каледина, А.Н. Качурин // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. – 2011. – Вып. 1. – С. 80-84.

43. Качурин, Н.М. Ретроспективная оценка уровня безопасности подземной добычи угля на шахтах Подмосковского бассейна / Н.М. Качурин, Г.В. Стась, Д.Н. Шкуратский, Е.В. Смирнова // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. – 2014. – Вып. 2. – С. 58-66.

44. Качурин, Н.М. Теоретическое обоснование оценки риска аварий на угольных шахтах по газовому фактору / Н.М. Качурин, А.М. Борщевич, О.Н. Качурина // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. – 2009. – Вып. 1. – С. 229-237.

45. Килимник, В.Г. Основные результаты реструктуризации угольной отрасли России / В.Г. Килимник // *Горная промышленность*. – 2003. – № 1. – С. 2-6.

46. Кирин, Б.Ф. Защита в чрезвычайных ситуациях / Б.Ф. Кирин, Н.О. Каледина, Г.И. Слепцов. – М.: Изд-во. МГГУ, 2004. – 285 с.

47. Колесниченко, Е.А. Геолого-генетические основы предотвращения взрывов метана в шахте / Е.А. Колесниченко, И.Е. Колесниченко // *Горная промышленность*. – 2005. – № 1. – С. 42-45.

48. Кононюк, А.Е. Обобщенная теория моделирования. Начала. К.1. Ч.3. / А.Е. Кононюк. – Киев: Освіта України, 2012. – 568 с.

49. Концепция приемлемого риска [Электронный ресурс] / МЧС России. – URL: <http://www.mchs.gov.ru/dop/terms/item/87812/>

50. Коршунов, Г.И. Исследование факторов риска взрывов метана и пыли в угольных шахтах на основе анализа статистических данных / Г.И. Коршунов, Е.И. Кабанов // Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», Санкт-Петербург, 18-20 октября 2017 г.: Сборник тезисов / Санкт-Петербургский горный университет. – СПб., – 2017. – С. 104-105.

51. Коршунов, Г.И. Разработка методики оценки рисков аварий на угольных шахтах с учетом конкретных горно-геологических условий / Г.И. Коршунов, О.И. Казанин, М.Л. Рудаков, А.О. Недосекин, Е.И. Кабанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 374-383.

52. Костеренко, В.Н. Факторы, оказывающие влияние на возникновение взрывов газа метана и угольной пыли в шахтах / В.Н. Костеренко, А.Н. Тимченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. – С. 368-377.

53. Костогрызov, А.И. Основы противоаварийной устойчивости угольных предприятий / А.И. Костогрызov, В.Н. Костеренко, А.Н. Тимченко, В.Б. Артемьев. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2014. – 336 с.

54. Кравчук, И.Л. Прогноз развития систем обеспечения безопасности производства угледобывающих предприятий на основе управления рисками возникновения негативных событий / И.Л. Кравчук // Проблемы недропользования. – 2015. – № 1(4). – С. 115-122.

55. Курта, И.В. Зависимость метанообильности высокопроизводительных лав от скорости подвигания очистного забоя (на примере шахт ОАО «СУЭК-Кузбасс» / И.В. Курта, Г.И. Коршунов, И.А. Павлов, Е.П. Ютяев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 4. – С. 200-203.

56. Лисанов, М.В. О техническом регулировании и критериях приемлемого риска / М.В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 5. – С. 11-14.

57. Лисовский, В.В. Управление производственным риском путем предотвращения критической совокупности опасных факторов на угледобывающем предприятии: Дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Лисовский Владимир Владимирович. – М., 2016. – 152 с.

58. Мазикин, В.П. Методология и опыт управления газовыделением на шахтах в условиях технического и технологического перевооружения / В.П. Мазикин. – М.: Изд-во. МГГУ, 2001. – 104 с.

59. Матковская, М.О. Исследование алгоритмов нечеткого вывода в моделях принятия решений / М.О. Матковская // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 3 (92). – С. 240-244.

60. Медведев, А.Е. Методики оценки риска на угольных шахтах / А.Е. Медведев // Горный информационно-технический бюллетень. – 2009. – № 8. – С. 86-90.

61. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (РД 03-409-01) // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сборник документов. Сер. 27. Вып. 2 / Кол. авт. – М.: ЗАО «НТЦ ПБ», 2010. – 208 с.

62. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: рук. по безопасности. – Сер. 27. – Вып. 16. – М.: ЗАО «НТЦ ПБ», 2017. – 56 с.

63. Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах: рук. по безопасности. – Сер. 05. – Вып. 52. – М.: ЗАО «НТЦ ПБ», 2017. – 36 с.

64. Мясников, С.В. Метод комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли / С.В. Мясников, Г.И. Коршунов, Е.И. Кабанов // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 5. – С. 60-65.

65. Немчинов, Д.В. Оценка риска аварий с использованием экспертных систем / Д.В. Немчинов // Вестник АГТУ. – 2007. – № 1 (36). – С. 40-45

66. Непараметрическая статистика и подгонка распределений [Электронный ресурс] / StatSoft. Электронный учебник по статистике. – URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stnonpar.html>

67. Нецепляев, М.И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин и др. – М.: Недра, 1992. – 298 с.

68. Новоселов, С.В. Травматизм в угольной промышленности России и прогнозирование риска аварий взрыва метана на опасном производственном объекте – в очистном забое сверхкатегорийной шахты / С.В. Новоселов, С.А. Панихидников // Уголь. – 2017. – № 9. – С. 32-35.

69. О введении в действие Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли: Распоряжение Федерального горного и промышленного надзора России от 27 апреля 2004 г. № Р-7 [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901899801>

70. О введении в действие "Рекомендаций по содержанию, оформлению и порядку представления на государственную экспертизу материалов подсчета запасов металлических и неметаллических полезных ископаемых": Приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 30 апреля 1998 г. № 123 [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902023112>

71. О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях и Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»: федер. закон Рос. Федерации от 23 июля 2010 г. № 171-ФЗ [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902227387>

72. О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля: федер. закон Рос. Федерации от 26 декабря 2008 г. № 294-ФЗ [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902135756>

73. О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации: Постановление Правительства Российской Федерации от 17 августа 2016 г. № 806 (с изм. на 19 февраля 2018 г.) [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420372694>

74. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федер. закон Рос. Федерации от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (с изм. на 07 марта 2017 г.). – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. – 52 с.

75. О решениях по итогам совещания о состоянии и перспективах развития угольной промышленности [Электронный ресурс] / Правительство России. – URL: <http://government.ru/orders/selection/401/22567/>

76. Об аттестации экспертов в области промышленной безопасности: Постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2015 г. № 509 [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420277211/>

77. Об утверждении Инструкции по дегазации угольных шахт: Приказ Ростехнадзора от 01 декабря 2011 г. № 679 (с изм. на 08 августа 2017 г.) [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902321893>

78. Об утверждении Концепции демографической политики Российской Федерации на период до 2025 года: Указ Президента Российской Федерации от 09 ноября 2007 г. № 1351 (с изм. на 01 июля 2014 г.) [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902064587>

79. Об утверждении Положения о федеральном государственном надзоре за соблюдением трудового законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права: Постановление Правительства Российской Федерации от 01 сентября 2012 г. № 875 (с изм. на 30 апреля 2018 г.) [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902367573>

80. Об утверждении Порядка проведения технического расследования причин аварий, инцидентов и случаев утраты взрывчатых материалов

промышленного назначения на объектах, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору: Приказ Ростехнадзора от 19 августа 2011 г. № 480 (с изм. на 15 августа 2017 г.) [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902297525>

81. Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2030 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 июня 2014 г. № 1099-р [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420204008>

82. Об утверждении Типового положения о единой системе управления промышленной безопасностью и охраной труда для организаций по добыче (переработке) угля (горючих сланцев): Приказ Ростехнадзора от 30 ноября 2017 г. № 520 [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/542613698>

83. Об утверждении Типового положения о системе управления охраной труда: Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 19 августа 2016 г. № 438н [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420376480>

84. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Инструкция по контролю состава рудничного воздуха, определению газообильности и установлению категорий шахт по метану и/или диоксиду углерода": Приказ Ростехнадзора от 06 декабря 2012 г. № 704 (с изм. на 08 августа 2017 г.) [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902387289>

85. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах": Приказ Ростехнадзора от 19 ноября 2013 г. № 550 (с изм. на 08 августа 2017 г.) [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/499060050>

86. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила проведения экспертизы промышленной безопасности":

Приказ Ростехнадзора от 14 ноября 2013 г. № 538 (с изм. на 28 июля 2016 г.) [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/499058129>

87. Осташев, В.В. Применение нечеткой логики при анализе и синтезе сложных систем / В.В. Осташев // Вестник ПГПУ. Серия: Естественные и физико-математические науки. – 2007. – № 2. – С. 74-78.

88. Павленко, М.В. Оценка риска воспламенения метано-воздушной смеси в зонах подверженных комплексному воздействию на угольный массив / М.В. Павленко, Ю.Ф. Васючков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. – С. 266-272.

89. Перечень типовых нарушений обязательных требований в сфере компетенции Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс] / Охрана труда в России. – URL: <https://ohranatruda.ru/upload/medialibrary/985/Perechen-tipovykh-narusheniy-obyazatelnykh-trebovaniy-v-sfere-kompetentsii-Rostekhnadzora.pdf>

90. Писаренко, М.В. Угольная промышленность России в долгосрочной перспективе / М.В. Писаренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 7. – С. 69-75.

91. Поздеев, И.А. Исследование характера деформирования геомассива и формирования газового коллектора в выработанном пространстве отрабатываемого угольного пласта / И.А. Поздеев, И.М. Поздеев, П.В. Васильев, А.А. Бутко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 12. – С. 171-179.

92. Попов, А.Н. Риск-ориентированный подход в промышленной безопасности / А.Н. Попов, Н.С. Ивашова, А.А. Деулин и др. // Промышленная и экологическая безопасность, охрана труда. – 2015. – № 2 (99). – С. 20-22.

93. Портола, В.А. Оценка концентрационных пределов взрывчатости угольной пыли / В.А. Портола // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 5. – С. 16-21.

94. Пучков, Л.А. Динамика метана в выработанных пространствах угольных шахт / Л.А. Пучков, Н.О. Каледина. – М.: МСМУ, 1995. – 313 с.

95. Рубанов, В.Г. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах: учеб. пособие / В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2010. – 170 с.

96. Рудаков, М.Л. Оценка и управление рисками в современных системах управления охраной труда в организации / М.Л. Рудаков. – СПб.: Свое издательство, 2014. – 90 с.

97. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт / колл. авт. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1989. – 319 с.

98. Рыков, А.М. Риск-ориентированный подход в обеспечении безопасности угольных шахт / А.М. Рыков, Ли Хи Ун, Ю.М. Филатов // Научно-технический журнал «Вестник». – 2016 – № 1. – С. 73-76.

99. Сергеев, И.В. Выделение метана из выработанных пространств в угольных шахтах и его извлечение средствами дегазации / И.В. Сергеев, И.И. Беломойцева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 7. – С. 158-160.

100. Сибикина, И.В. Анализ рисков информационной безопасности с использованием системы нечеткого вывода / И.В. Сибикина // Научный вестник НГТУ. – 2016. - № 4. – С. 121-134.

101. Скопинцева, О.В. Влияние химреагентной обработки угля на его пылеобразующую способность / О.В. Скопинцева, А.Ю. Прокопович, Ю.В. Соловьев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 3. – С. 185-194.

102. Скопинцева, О.В. Интегральная оценка аэрологического риска аварий для выемочных участков угольных шахт / О.В. Скопинцева, С.В. Баловцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 4. – С. 193-195.

103. Скопинцева, О.В. Показатели аэрологического риска аварий на выемочных участках угольных шахт / О.В. Скопинцева, С.В. Баловцев, В.Н. Михайлова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 5. – С. 229-234.

104. Стариков, А.В. Методика оценки профессионального риска в нефтегазовой отрасли как инструмент промышленной безопасности / А.В. Стариков, У.А. Хесткова // Проблемы современной науки и образования. – 2015. – № 9 (39). – С. 62-65.

105. Стась, Г.В. Оценка риска возникновения аварий при добыче бурых углей / Г.В. Стась, Л.Э. Шейнкман, Е.В. Смирнова // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2015. – Вып. 3. – С. 31-41.

106. Статистический сборник ТЭК России – 2016: Выпуск июнь 2017 [Электронный ресурс] / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/13691.pdf>

107. Тарзанов, И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2016 года / И.Г. Тарзанов // Уголь. – 2017. – № 3. – С. 36-50.

108. Твердов, А.А. Тенденции повышения безопасности на угольных шахтах с особо опасными горно-геологическими условиями / А.А. Твердов, С.Б. Никишичев, А.Б. Яновский, А.И. Скрыль // Уголь. – 2017. – № 3. – 4-9.

109. Трудовой кодекс Российской Федерации (с изм. и доп. на 05 февраля 2018 г.) [Электронный ресурс] / Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901807664>

110. Уварова, В.А. О причинах отравлений при крупных авариях на угольных шахтах / В.А. Уварова // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 6 (46). – С. 1-7.

111. Унгуряну, Т.Н. Сравнение трех более независимых групп с использованием непараметрического критерия Краскела-Уоллиса в программе STATA / Т.Н. Унгуряну, А.М. Гржибовский // Экология человека. – 2014. – № 6. – С. 55-58

112. Ушаков, В.К. Оценка причинно-следственных связей между факторами, влияющими на аэрологический риск на угольных шахтах / В.К. Ушаков, С.В. Баловцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. – С. 363-366.

113. Форсюк, А.А. Состояние промышленной безопасности на угольных шахтах РФ / А.А. Форсюк, С.С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 12. – С. 23-26.

114. Шевченко, Л.А. Анализ газовых балансов выемочных участков шахт / Л.А. Шевченко, В.А. Ковалев // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 4(92). – С. 61-63.

115. Шевченко, Л.А. Газовыделение из отбитого угля при интенсивной отработке угольных пластов / Л.А. Шевченко, С.Н. Ливинская // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 1(107). – С. 164-167.

116. Шевченко, Л.А. Оценка результативности работы персонала угледобывающего предприятия по предотвращению нарушений требований безопасности / Л.А. Шевченко, В.Ю. Гришин // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 5. – С. 123-131.

117. Шевченко, Л.А. Оценка условий труда и риска производственного травматизма на опасных производственных объектах / Л.А. Шевченко, Е.А. Замигулова, Н.С. Михайлова и др. // Международная научно-практическая конференция «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах», Кемерово, 22-23 ноября 2017 г.: сборник материалов / Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2017. – С. 224-231.

118. Шевченко, Л.А. Специфика и тенденции производственного травматизма и профессиональных заболеваний работников организаций Кемеровской области / Л.А. Шевченко // Вестник КемГУ. Серия: биологические, технические науки и науки о Земле. – 2017. – № 3(3). – С. 65-71.

119. Штовба, С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику / С.Д. Штовба. – Винница: Континент-Прим, 2003. – 198 с.

120. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007. – 288 с.

121. Шувалов, Ю.В. Влияние технологических факторов на газовыделение из выработанного пространства в выработки добычных участков Воркуты /

Ю.В. Шувалов, И.А. Павлов, М.М. Попов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 8. – С. 123-126.

122. Ямалов, И.У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций: учеб. пособие / И.У. Ямалов. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. – 413 с.

123. Burgess-Limerick, R. Bow-tie Analysis of a Fatal Underground Coal Mine Collision / R. Burgess-Limerick, T. Horberry, L. Steiner // Ergonomics Australia, – 2014. – Vol. 10. – P. 10-15.

124. Cioca, I.L. Explosion and/or Fire Risk Assessment Methodology: a Common Approach, Structured for Underground Coalmine Environments / I.L. Cioca, R.I. Moraru // Archives of Mining Sciences. – 2012. – Vol. 57. – P. 53-60.

125. Dodshon, P. Using Bow-Tie Analyses to Enhance Incident Investigation Activities / P. Dodshon, R. Burgess-Limerick [Электронный ресурс] / International Ergonomics Association. – URL: <https://www.iea.cc/congress/2015/352.pdf>

126. Grayson, R.L. Pilot Sample Risk Analysis for Underground Coal Mine Fires and Explosions Using MSHA Citation Data / R.L. Grayson, H. Kinilakodi, V. Kecojevic // Safety Science. – 2009. – № 47. – P. 1371-1378.

127. Iannacchione, A. The Application of Major Hazard Risk Assessment (MHRA) to Eliminate Multiple Fatality Occurrences in the US Minerals Industry / A. Iannacchione, F. Varley, T. Brady. – Spokane: National Institute for Occupational Safety and Health, 2008. – 132 p.

128. Iphar, M. Fuzzy Risk Assessment for Mechanized Underground Coal Mines in Turkey / M. Iphar, A.K. Cukurluo / International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. – 2018. – № 3. - P. 110-158.

129. Kirsch, P.A. Could RiskGate Be Aapplied to Industry Scale Knowledge Management in European Mining? / P.A. Kirsch // Proceedings of the International Conference of Safety in Mines Research Institutes. – 2013. – Vol. 35. – P. 2-10.

130. Kirsch, P. RISKGATE: Promoting and Redefining Best Practice for Risk Management in the Australian Coal Industry [Электронный ресурс] / P. Kirsch,

S. Goater, J. Harris, D. Sprott, J. Joy // University of Wollongong Australia. – URL: <http://ro.uow.edu.au/coal/421/>

131. Kissell, F.N. Methods for Controlling Explosion Risk at Coal Mine Working Faces / F.N. Kissell, J.C. Tien, E.D. Thimons // Proceedings of the International Conference of Safety in Mines Research Institutes. – 2007. – Vol. 32. – P. 161-168.

132. Komljenovic, D. Injuries in U.S. Mining Operations – A Preliminary Risk Analysis / D. Komljenovic, W.A. Groves, V.J. Kecojevic // Safety Science. – 2008. – № 46. – P. 792-801.

133. Korshunov, G.I. The Use of a Risk-based Approach In Safety Issues of Coal Mines / G.I. Korshunov, M.L. Rudakov, E.I. Kabanov // Journal of Environmental Management and Tourism. – 2018. – Vol. IX (Spring), 1(25). – P. 181-186.

134. Krause, E. Methane Risk Assessment in Underground Mines by Means of a Survey by the Panel of Experts (SOPE) / E. Krause¹, K. Krzemien // Journal of Sustainable Mining. – 2014 – № 13(2). – P. 6-13.

135. Kumar, R Mines Systems Safety Improvement Using an Integrated Event Tree and Fault Tree Analysis / R. Kumar, A.K. Ghosh // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. – 2017. – Vol. 98. – P. 101-108.

136. Markowski, A.S. Application of Fuzzy Logic to Explosion Risk Assessment / A.S. Markowski, M.S. Mannan, A. Kotynia, H. Pawlak // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2011. – № 24. – P. 780-790.

137. Mevsim, R. Risk Assessment by Fault Tree Analysis of Methane Explosions in Turkish Hard Coal Enterprises Underground Mines / R. Mevsim. - Ankara: Middle East Technical University, 2016. - 125 p.

138. Nedosekin, A. Fuzzy Financial Management / A. Nedosekin. – Moscow: AFA Library, 2003. – 184 p.

139. Nguyen, T.H. The Risk Management System in German Hard Coal Companies and the Transference to Southeast Asia: genehmigte Dissertation / T.H. Nguyen. – Aachen: Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2013. – 197 p.

140. Paithankar, A. Hazard Identification and Risk Analysis in Mining Industry / A. Paithankar, – Rourkela: Department of Mining Engineering National Institute of Technology, 2011. – 84 p.

141. Pejic, L.A. A New Simple Methodology for Evaluation of Explosion Risk in Underground Coal Mines / L.A. Pejic, J.G. Torrent, E. Querol, K. Lebecki // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2013. – № 26. – P. 1524-1529.

142. Qifeng, N. Research and Application of Safety Assessment Method of Gas Explosion Accident in Coal Mine Based on GRA-ANP-FCE / N. Qifeng, S. Shiliang, L. Runqiu // Procedia Engineering. – 2012. – № 45. – P. 106 – 111.

143. Risk Management Guidelnes: Standards Australia AS/NZS 4360:2004 [Электронный ресурс] / University of California. – URL: https://www.ucop.edu/enterprise-risk-management/_files/as_stdnds4360_2004.pdf

144. Sari, M. Risk Assessment Approach on Underground Coal Mine Safety Analysis / M. Sari. – Ankara: Middle East Technical University, 2002. – 210 p.

145. Shariati, S. Underground Mine Risk Assessment by Using FMEA in the Presence of Uncertainty / S. Shariati // Decision Science Letters. – 2014. – № 3. – P. 295–304/

146. Shi, L. A Risk Assessment Method to Quantitatively Investigate the Methane Explosion in Underground Coal Mine / L. Shi, J. Wang, G. Zhang, X. Cheng X. Zhao // Process Safety and Environmental Protection. – 2017. – Vol. 107. – P. 317-333.

147. Tripathy, D.P. Risk Assessment in Underground Coalmines Using Fuzzy Logic in the Presence of Uncertainty / D.P. Tripathy, C.K. Ala // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. – 2018. – Vol. 99. – P. 157-163.

148. Wang, H. A Novel Method of Fuzzy Fault Tree Analysis Combined with VB Program to Identify and Assess the Risk of Coal Dust Explosions [Электронный ресурс] / H. Wang, J. Li, D. Wang, Z. Huang // PLoS One. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5549981/>

149. Zadeh, L. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes / IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1973. – Vol. SMC-3 Issue 1. – P. 28 – 44.

Приложение А

Результаты группирования данных для расчета критерия Краскела-Уоллиса

Таблица А.1 – Распределение частот взрывов метана по группам в зависимости от относительной газообильности

Частота аварий, год ⁻¹	Относительная газообильность, м ³ /т				
	< 5	5 ÷ 15	15 ÷ 25	25 ÷ 35	> 35
0	32	13	10	5	2
0,0 ÷ 0,1	-	3	4	2	2
0,1 ÷ 0,2	1	5	1	2	1
0,2 ÷ 0,3	-	1	3	1	1
0,3 ÷ 0,4	-	1	1	1	-
0,4 ÷ 0,5	-	1	-	1	-
Всего шахт	33	24	19	12	6
Средний ранг	32,91	52,88	53,61	60,46	61,00

Таблица А.2 – Распределение частот взрывов метана по группам в зависимости от абсолютной газообильности

Частота аварий, год ⁻¹	Абсолютная газообильность, м ³ /мин				
	< 40	40 ÷ 80	80 ÷ 120	120 ÷ 160	> 160
0	50	5	4	2	1
0,0 ÷ 0,1	3	2	3	2	1
0,1 ÷ 0,2	7	2	1	-	-
0,2 ÷ 0,3	4	1	-	1	-
0,3 ÷ 0,4	2	-	-	-	1
0,4 ÷ 0,5	2	-	-	-	-
Всего шахт	68	10	8	5	3
Средний ранг	44,65	53,80	51,63	57,40	63,67

Таблица А.3 – Распределение частот взрывов метана по группам в зависимости от глубины разработки

Частота аварий, год ⁻¹	Глубина, м				
	< 200	200 ÷ 400	400 ÷ 600	600 ÷ 800	> 800
0	4	22	13	4	6
0,0 ÷ 0,1	-	3	4	1	3
0,1 ÷ 0,2	-	2	5	2	-
0,2 ÷ 0,3	1	1	4	-	-
0,3 ÷ 0,4	-	2	1	-	-
0,4 ÷ 0,5	-	2	-	-	-
Всего шахт	5	32	27	7	9
Средний ранг	34,30	38,55	45,96	39,86	35,00

Таблица А.4 – Распределение частот взрывов метана по группам в зависимости от суточной производительности

Частота аварий, год ⁻¹	Производительность, т/сут				
	< 2500	2500 ÷ 5000	5000 ÷ 7500	7500 ÷ 10000	> 10000
0	20	20	12	4	5
0,0 ÷ 0,1	2	3	4	2	-
0,1 ÷ 0,2	5	3	1	-	1
0,2 ÷ 0,3	3	2	-	-	1
0,3 ÷ 0,4	1	1	-	1	-
0,4 ÷ 0,5	1	1	-	-	-
Всего шахт	32	30	17	7	7
Средний ранг	49,20	46,78	42,47	49,79	46,07

Таблица А.5 – Распределение частот взрывов метана по группам в зависимости от системы разработки

Частота аварий, год ⁻¹	Система разработки			
	ДСО	ПШО	ПГО	ЩО
0	61	-	1	-
0,0 ÷ 0,1	11	-	-	-
0,1 ÷ 0,2	8	1	1	-
0,2 ÷ 0,3	3	-	2	1
0,3 ÷ 0,4	2	-	-	1
0,4 ÷ 0,5	-	1	1	-
Всего шахт	85	2	5	2
Средний ранг	44,04	85,50	75,00	87,75

Таблица А.6 – Распределение частот взрывов метана по группам в зависимости от способа проветривания

Частота аварий, год ⁻¹	Способ проветривания		
	Н	НВ	В
0	18	5	17
0,0 ÷ 0,1	3	2	4
0,1 ÷ 0,2	8	-	1
0,2 ÷ 0,3	4	1	1
0,3 ÷ 0,4	2	1	-
0,4 ÷ 0,5	1	1	-
Всего шахт	36	10	23
Средний ранг	38,56	38,70	27,83

Таблица А.7 – Распределение частот взрывов метана по группам в зависимости от схемы проветривания

Частота аварий, год ⁻¹	Схема проветривания		
	Ф	К	Ц
0	15	14	8
0,0 ÷ 0,1	1	5	3
0,1 ÷ 0,2	2	3	4
0,2 ÷ 0,3	2	3	1
0,3 ÷ 0,4	1	2	-
0,4 ÷ 0,5	-	2	-
Всего шахт	21	29	16
Средний ранг	28,76	36,62	34,06

Таблица А.8 – Распределение частот взрывов метана по группам в зависимости от склонности пластов к самовозгоранию

Частота аварий, год ⁻¹	Опасность пластов по самовозгоранию		
	Не склонный	Склонный	Весьма склонный
0	25	16	6
0,0 ÷ 0,1	7	3	1
0,1 ÷ 0,2	2	1	4
0,2 ÷ 0,3	-	2	4
0,3 ÷ 0,4	-	1	1
0,4 ÷ 0,5	-	-	1
Всего шахт	34	23	17
Средний ранг	32,21	35,28	51,09

Таблица А.9 – Распределение частот смертельного травмирования персонала по группам в зависимости от частоты взрывов метана

Частота смертельного травмирования, год ⁻¹	Частота аварий, год ⁻¹				
	0	0 ÷ 0,1	0,1 ÷ 0,2	0,2 ÷ 0,3	> 0,3
0	66	5	5	1	2
10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁴	-	-	1	2	-
10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³	-	3	3	3	1
10 ⁻³ ÷ 10 ⁻²	-	3	1	1	1
Всего шахт	66	11	10	7	4
Средний ранг	40,00	68,91	63,80	79,29	65,00

Таблица А.10 – Распределение частот смертельного травмирования персонала при взрывах метана по группам в зависимости от относительной газообильности

Частота смертельного травмирования, год ⁻¹	Относительная газообильность, м ³ /т				
	< 5	5 ÷ 15	15 ÷ 25	25 ÷ 35	> 35
0	33	20	11	8	3
10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁴	-	-	1	1	1
10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³	-	3	6	1	1
10 ⁻³ ÷ 10 ⁻²	-	1	1	2	1
Всего шахт	33	24	19	12	6
Средний ранг	38,00	46,21	56,68	54,33	62,17

Таблица А.11 – Распределение частот смертельного травмирования персонала при взрывах метана по группам в зависимости от абсолютной газообильности

Частота смертельного травмирования, год ⁻¹	Абсолютная газообильность, м ³ /мин				
	< 40	40 ÷ 80	80 ÷ 120	120 ÷ 160	> 160
0	57	9	5	2	2
10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁴	3	-	-	-	-
10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³	8	1	1	1	-
10 ⁻³ ÷ 10 ⁻²	-	-	2	2	1
Всего шахт	68	10	8	5	3
Средний ранг	45,01	42,50	58,00	69,20	56,33

Таблица А.12 – Распределение частот смертельного травмирования персонала при взрывах метана в зависимости от глубины разработки

Частота смертельного травмирования, год ⁻¹	Глубина, м				
	< 200	200 ÷ 400	400 ÷ 600	600 ÷ 800	> 800
0	5	25	19	5	7
10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁴	-	1	2	-	-
10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³	-	5	3	2	1
10 ⁻³ ÷ 10 ⁻²	-	1	3	-	1
Всего шахт	5	32	27	7	9
Средний ранг	31,00	39,69	42,41	42,71	41,22

Таблица А.13 – Распределение частот смертельного травмирования персонала при взрывах метана по группам в зависимости от суточной производительности

Частота смертельного травмирования, год ⁻¹	Производительность, т/сут				
	< 2500	2500 ÷ 5000	5000 ÷ 7500	7500 ÷ 10000	> 10000
0	24	26	13	6	5
10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁴	3	-	-	-	-
10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³	4	3	2	-	1
10 ⁻³ ÷ 10 ⁻²	1	1	2	1	1
Всего шахт	32	30	17	7	7
Средний ранг	47,81	43,83	49,79	45,29	51,79

Таблица А.14 – Распределение частот смертельного травмирования персонала при взрывах метана по группам в зависимости от системы разработки

Частота смертельного травмирования, год ⁻¹	Система разработки			
	ДСО	ПШО	ПГО	ЩО
0	73	-	1	1
10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁴	-	1	2	-
10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³	7	1	2	1
10 ⁻³ ÷ 10 ⁻²	5	-	-	-
Всего шахт	85	2	5	2
Средний ранг	45,01	82,00	71,20	59,50

Таблица А.15 – Распределение частот смертельного травмирования персонала при взрывах метана по группам в зависимости от способа проветривания

Частота смертельного травмирования, год ⁻¹	Способ проветривания		
	Н	НВ	В
0	25	7	19
10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁴	1	1	1
10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³	7	1	2
10 ⁻³ ÷ 10 ⁻²	3	1	1
Всего шахт	36	10	23
Средний ранг	36,36	36,50	32,22

Таблица А.16 – Распределение частот смертельного травмирования персонала при взрывах метана по группам в зависимости от схемы проветривания

Частота смертельного травмирования, год ⁻¹	Схема проветривания		
	Ф	К	Ц
0	20	16	12
$10^{-5} \div 10^{-4}$	-	2	1
$10^{-4} \div 10^{-3}$	-	9	1
$10^{-3} \div 10^{-2}$	1	2	2
Всего шахт	21	29	16
Средний ранг	26,33	39,03	32,88

Таблица А.17 – Распределение частот смертельного травмирования персонала при взрывах метана по группам в зависимости от опасности пластов по самовозгоранию

Частота смертельного травмирования, год ⁻¹	Опасность пластов по самовозгоранию		
	Не склонный	Склонный	Весьма склонный
0	27	20	9
$10^{-5} \div 10^{-4}$	-	2	1
$10^{-4} \div 10^{-3}$	4	-	6
$10^{-3} \div 10^{-2}$	3	1	1
Всего шахт	34	23	17
Средний ранг	36,69	33,00	45,21